

ÉCOULEMENTS A CO-COURANT ET A CONTRE-COURANT D'EAU ET D'AIR DANS UN FAISCEAU DE TUBES

SÉCHAGE EN MILIEU FLUIDISÉ

THÈSES PRÉSENTÉES A LA FACULTÉ
DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ
DE NANCY POUR OBTENIR LE
TITRE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR
PAR **Jean-François COLAS**,
INGÉNIEUR E.N.S.I.C., LICENCIÉ
ÈS-SCIENCES PHYSIQUES.

Soutenues le Avril 1966, devant la Commission d'Examen

Président : M. R. GIBERT

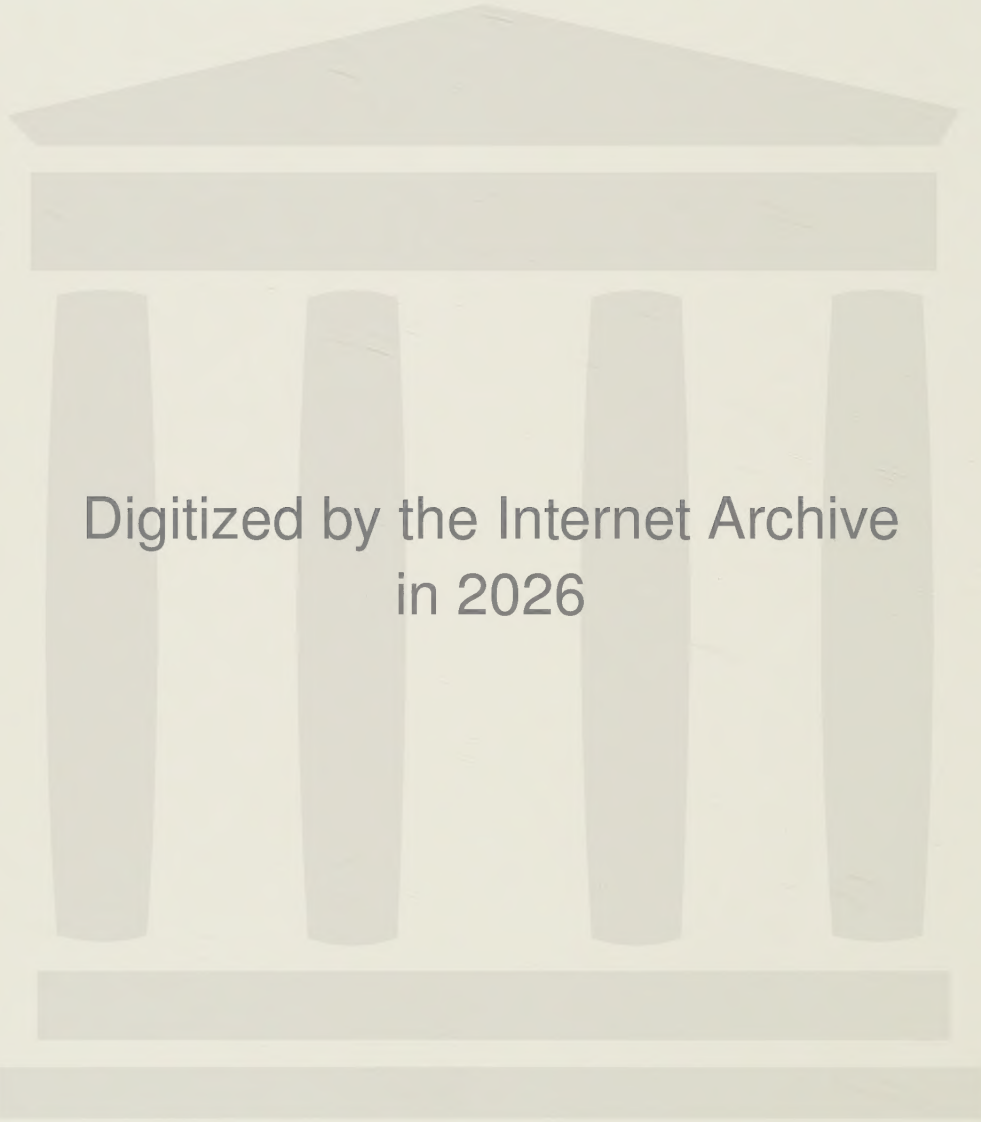
Examineurs : MM. J. BASTICK
P. LE GOFF

UDART & CLMENT

RELIEURS

11, RUE SAINTE-ANNE, 11

TÉLÉPH. 52.80.09 - NANCY



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555023_0017

ÉCOULEMENTS A CO-COURANT ET A CONTRE-COURANT D'EAU ET D'AIR DANS UN FAISCEAU DE TUBES

SÉCHAGE EN MILIEU FLUIDISÉ

THÈSES PRÉSENTÉES A LA FACULTÉ
DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ
DE NANCY POUR OBTENIR LE
TITRE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR
PAR **Jean-François COLAS**,
INGÉNIEUR E.N.S.I.C., LICENCIÉ
ÈS-SCIENCES PHYSIQUES.

Soutenues le Avril 1966, devant la Commission d'Examen

Président : M. R. GIBERT

Examineurs : MM. J. BASTICK
P. LE GOFF

Doyen : M. AUBRYAssesseur : M. GAYDoyens honoraires : MM. CORNUBERT - DELSARTE - URION - ROUBAULT.Professeurs honoraires : MM. CROZE - RAYBAUD - LAFFITTE - LERAY - JULY - LAPORTE - EICHHORN - GODEMENT - DUBREUIL - L. SCHWARTZ - DIEUDONNE - DE MALLEMANN - LONGCHAMON - LETORT - DODE - GAUTHIER - GOUDET - CORNUBERT-CHAPELLE - GUERIN - WAHL.Maîtres de conférences honoraires : MM. LIENHART - PIERRET.Professeurs

MM.

URION	Chimie biologique	+ MALAPRADE	Chimie
DELSARTE	Analyse supérieure	MANGENOT	Botanique
ROUBAULT	Géologie	GAYET	Physiologie
CAPELLE	Mécanique rationnelle	BONVALET	Mécanique appliquée
VEILLET	Biologie animale	HADNI	Physique
BARRIOL	Chimie théorique	+ BASTICK	Chimie
BIZETTE	Physique	+ KERN	Minéralogie
GUILLIEN	Electronique	DUCHAUFOR	Pédologie
GIBERT	Chimie physique	+ GARNIER	Agronomie
LEGRAS	Mécanique rationnelle	+ WEPPE	Minéralogie appliquée
BOLFA	Minéralogie	NEEL	Chimie organique indust.
NICLAUSE	Chimie	+ BERNARD	Géologie appliquée
FAIVRE	Physique appliquée	+ CHAMPIER	Physique
AUBRY	Chimie minérale	+ GAY	Chimie biologique
COPPENS	Radiogéologie	+ REGNIER	Physico-chimie
DUVAL	Chimie	+ STEPHAN	Zoologie
FRUHLING	Physique	+ CONDE	Zoologie
HILLY	Géologie	+ WERNER	Botanique
LE GOFF	Génie chimique	EYMARD	Calcul diff. et intégral
SUHNER	Physique expérimentale	LEVISALLES	Chimie organique
CHAPON	Chimie biologique	Mme HERVE	Méthodes mathématiques de la physique
HEROLD	Chimie min. indust.	+ GOSSE	Mécanique physique
SCHWARTZ	Exploitation minière	FELDEN	Physique

+ Professeur titulaire à titre personnel.

Maîtres de Conférence

Mme	BASTICK	Chimie M.P.C. (Epinal)
MM.	GUDEFIN	Physique
	ROCCI	Géologie
	VUILLAUME	Psychophysiology
	FRENTZ	Biologie animale
	HORN	Physique propédeutique
	LAFON	Physique (I.S.I.N.)
	MARI	Chimie (I.S.I.N.)
	AUROUZE	Géologie
	DEVIOT	Physique du solide
	FLECHON	Physique M.P.C.
Mlle	HUET	Mathématiques S.P.C.N.
	VIGNES	Métallurgie
	BALESDENT	Thermodynamique chimique appliquée
	BLAZY	Minéralogie appliquée (E.N.S.G.)
	JANOT	Physique M.P.C. (Epinal)
	JACQUIN	Pédologie et chimie agricole
	MAINARD	Physique M.G.P.
	CACHAN	Entomologie appliquée (E.N.S.A.)
	MARTIN	Chimie M.P.C.
	PAULMIER	Mécanique expérimentale
N...		Probabilités et statistiques
N...		Mécanique (I.S.I.N.)
N...		Mathématiques
N...		Génie chimique
N...		Mathématiques M.P.C.
N...		Mathématiques S.P.C.N.
N...		Mathématiques appliquées
N...		Mécanique des fluides (I.S.I.N.)
N...		Physiologie animale.

A mon Maître

Monsieur le Professeur LE GOFF

Hommage respectueux.

A ma Femme

A mes Parents

en témoignage d'affection.

Le présent travail a été effectué sous la direction de Monsieur le Professeur LE GOFF, dans son laboratoire de Génie Chimique de l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques à NANCY. Je suis profondément reconnaissant à mon Maître pour l'intérêt constant qu'il a bien voulu témoigner à mes recherches et pour les conseils éclairés dont il m'a fait bénéficier. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma gratitude pour la formation que j'ai pu acquérir sous sa bienveillante direction.

Je suis très sensible à l'honneur qu'a bien voulu me faire Monsieur le Professeur GIBERT en acceptant de présider mon Jury d'examen, et je l'en remercie bien vivement.

Je remercie également Monsieur le Professeur BASTICK, Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques, d'avoir bien voulu faire partie de ce Jury.

Toute ma gratitude va également à l'Institut Français du Pétrole pour l'aide matérielle que j'ai reçue pendant mes recherches.

J'adresse enfin un amical souvenir à toute la sympathique équipe de chercheurs et de techniciens du laboratoire de Génie Chimique.

--::--::--

ÉCOULEMENTS A CONTRE-COURANT ET

A CO-COURANT D'EAU ET D'AIR

DANS UN FAISCEAU DE TUBES

-:-:-

I N T R O D U C T I O N

De nombreuses études globales ont été faites sur les colonnes d'absorption gaz-liquide à garnissage ; elles ont donné une accumulation de résultats expérimentaux sur la chute de pression subie par le courant gazeux traversant le garnissage sec ou arrosé, la retenue liquide moyenne de colonne, les débits maximaux à l'engorgement, l'efficacité du transfert etc... Ces études globales n'ont pas permis de résoudre de nombreux problèmes tels que ceux posés par :

- le mécanisme de l'écoulement d'un liquide dans un garnissage ;
- l'origine des phénomènes de charge et d'engorgement ;
- la prédiction de la chute de pression d'un gaz traversant un garnissage arrosé.

Devant ces problèmes, il a été nécessaire d'entreprendre des recherches fondamentales sur les mécanismes qui régissent les phénomènes hydrodynamiques et le transfert de matière dans les colonnes d'absorption gaz-liquide.

Un programme de recherches systématiques dans ce domaine a débuté au laboratoire de Génie Chimique de l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques par le travail de B. LESPINASSE ; ce travail présente deux parties :

- la première partie comprend la réalisation d'un poste d'étude polyvalent des colonnes gaz-liquide à garnissage, des mesures de la chute de pression de l'air et de la retenue liquide de colonne pour un garnissage d'anneaux RASCHIG de 10 mm, une étude simultanée de l'efficacité du transfert et des grandeurs précitées. L'ensemble des résultats expérimentaux a mis en évidence la nécessité d'assurer une bonne répartition du liquide au sommet du garnissage.

- la deuxième partie est une contribution à l'étude du mécanisme

de l'écoulement du liquide à travers le garnissage arrosé. Il est montré que l'écoulement d'un liquide dans un garnissage n'est pas interprétable par un mécanisme diffusionnel isotrope ; il implique au contraire l'existence de chemins préférentiels qui ont une influence sur le transfert du soluté.

Un autre travail entrepris par C. PROST fait également partie de ce programme de recherches fondamentales : la mise en évidence de l'existence de chemins préférentiels n'est qu'une étape vers la détermination plus précise de la texture de la phase liquide s'écoulant dans un garnissage ; le travail de C. PROST a utilisé la mesure de la conductivité électrique apparente du garnissage irrigué, en valeur moyenne et en valeur instantanée, qui permet d'atteindre davantage la texture de la phase liquide en écoulement.

Dans les travaux précités, des hypothèses sont faites sur la texture du garnissage et sur l'état de la phase liquide. Notre travail, au contraire, fut de réaliser un modèle représenté par des tubes montés en parallèle et d'en étudier les propriétés hydrodynamiques.

L'exposé de notre travail comprend trois parties :

- dans la première partie on étudie l'écoulement gaz-liquide à contre-courant dans un tube seul et dans deux tubes montés en parallèle afin d'interpréter les propriétés hydrodynamiques du faisceau de 126 tubes fonctionnant à contre-courant.
- dans la deuxième partie on étudie l'écoulement gaz-liquide à co-courant descendant dans un tube seul afin d'interpréter les propriétés du faisceau de 126 tubes fonctionnant à co-courant.
- dans la troisième partie on compare les propriétés du faisceau de tubes et celles du garnissage d'anneaux Raschig utilisé par B. LESPINASSE et C. PROST.

PREMIERE PARTIE

ETUDE DE L'ECOULEMENT GAZ-LIQUIDE A CONTRE-COURANT

DANS UN FAISCEAU DE TUBES MONTES EN PARALLELE

--:--:--:--

C h a p i t r e I - 1

:-:-:-

ETUDE DE L'ÉCOULEMENT GAZ-LIQUIDE A CONTRE-COURANT DANS UN TUBE SEUL

-:-:-:-

I - 1.1 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.

Les propriétés hydrodynamiques de l'écoulement d'un film liquide à l'intérieur d'un tube avec ou sans contre-courant d'air ont été étudiées par de nombreux auteurs (2 à 10) dans des colonnes de diamètre généralement compris entre 12 mm et 100 mm ; en particulier, nous n'avons rencontré aucune étude sur colonne à film tombant de diamètre inférieur à 12 mm et tel qu'on observe la formation d'index de liquide stable.

Les débits d'air et d'eau étudiés sont tels que l'épaisseur du film liquide soit très petite devant le rayon intérieur du tube.

En conséquence, cette étude bibliographique a pour but de présenter un résumé de tous les résultats de la littérature qui, qualitativement, permettront de situer et de contrôler les résultats expérimentaux obtenus ici ; aucune comparaison quantitative ne pourra être faite.

Elle comprend trois parties :

- 1) Etudes classiques des colonnes à film tombant ;
- 2) Etudes des propriétés locales d'un film ruisselant ;
- 3) Etudes des critères de stabilité de l'écoulement annulaire.

I - 111 Etudes classiques des colonnes à film tombant.

Les grandeurs généralement étudiées dans une recherche sur les colonnes à film tombant sont :

- l'épaisseur moyenne de film avec et sans contre-courant d'air ;
- la chute de pression subie par un contre-courant d'air ;
- la limite de refoulement par l'air du film tombant.

Ces grandeurs sont étudiées en fonction des paramètres suivants :

Nombre de Reynolds du gaz Re_G , nombre de Reynolds du liquide Re_L , rapports $\frac{\rho_G}{\rho_L}$, $\frac{\eta_G}{\eta_L}$, $\frac{R}{\delta}$; ρ_G ρ_L sont les densités du gaz et du liquide, R est le rayon du tube, δ l'épaisseur de film, σ_L la tension superficielle du liquide.

L'influence de la longueur d'écoulement du film liquide, du diamètre du tube, de la forme de ses extrémités est également discutée.

D'autre part, pour un débit de liquide suffisamment grand, des rides apparaissent à la surface du film, à une distance déterminée du niveau d'introduction du liquide ; la longueur de la partie du film à surface non ridée dépend du diamètre du tube, du débit de liquide et surtout du mode d'introduction du liquide ; l'influence de cette grandeur sur l'épaisseur moyenne de film, sur le coefficient de chute de pression est étudiée.

I - 111 . 1 Etude de l'épaisseur moyenne de film.

W. NUSSELT (1) fait une étude théorique sur l'écoulement laminaire d'un film liquide le long d'une paroi plane, basée sur l'hypothèse d'une surface de film non perturbée, il obtient l'expression suivante :

$$\delta = \left(\frac{3 v_L^2}{g_a} \right)^{\frac{1}{3}} Re_L^{\frac{1}{3}}$$

δ : épaisseur moyenne de film.

v_L : viscosité cinématique du liquide.

g_a : accélération de la pesanteur.

$Re_L = \frac{\bar{u}_L \delta}{\nu}$ = nombre de Reynolds du liquide, rapporté à l'épaisseur moyenne de film.

$\bar{u}_L$: vitesse moyenne du liquide.

Malgré l'apparition de rides à la surface du film liquide à de faibles débits, C.M. COOPER, T.B. DREW, Mc ADAMS (2) ainsi que R. FALLAH, T.G. HUNTER et A.W. NASH (3) obtiennent des résultats expérimentaux en accord avec ceux prévus par la théorie de NUSSELT (1), ce qui signifierait que l'influence des vagues sur l'épaisseur moyenne de film est négligeable. Par contre, K. FEIND (4) n'obtient des résultats en accord avec ceux prévus pour une surface de film sans vague que dans le domaine limité où cette condition est vérifiée.

L'épaisseur moyenne de film est mesurée par des techniques différentes : H. BRAUER (5) photographie le film tombant, technique peu précise qui ne permet pas d'observer les variations dues à la présence des vagues. KAMEI et OISHI (6) utilisent une méthode de mesure directe du poids du liquide retenu dans la colonne qui est sus-

pendue à l'extrémité du bras d'une balance, cette méthode est peu précise, surtout lorsque les mesures sont faites en présence d'un contre-courant d'air. Ces auteurs, étudiant l'influence de la longueur du tube sur l'épaisseur moyenne de film, mettent en évidence l'accroissement de cette grandeur au niveau où le liquide quitte le tube. K. FEIND (4) mesure la retenue liquide du tube qu'il obtient par fermeture simultanée de deux robinets placés sur les conduites d'alimentation et d'évacuation du liquide. Les résultats obtenus par cet auteur l'ont conduit à partager le domaine d'écoulement laminaire en quatre parties :

- Domaine laminaire sans ride à la surface du film ;
- Domaine laminaire avec rides sinusoïdales de grande amplitude et de faible fréquence ;
- Domaine laminaire où les rides sont instables et de profil irrégulier ;
- Domaine des microrides de haute fréquence.

Les nombres de Reynolds du liquide caractéristiques, pour lesquels on passe d'un domaine à un autre sont exprimés en fonction d'un nombre sans dimension :

$$K_F = \frac{\rho_L \sigma_L^3}{g_a \eta_L^4}$$

Pour chaque domaine, l'auteur propose une relation expérimentale du type :

$$\log \delta = n \log v_{rel} + \frac{1}{3} v_{rel}^m \log \frac{3 v_L^2}{g_a}$$

m et n prennent des valeurs déterminées dans chacun des domaines :

$$v_{rel} = \frac{v_L}{0,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

Lorsque $v_L \leq 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ l'équation proposée par NUSSELT (1) est valable dans tout le domaine laminaire.

I - III . 2 Influence du film tombant sur l'écoulement du gaz.

La chute de pression subie par un courant d'air dans un tube ruisselant a été étudiée par S. KAMEI, J. OISHI et T. OKANA (7), E.R. GILLILAND, T.K. SHERWOOD (8), M. L. JACKSON, N.H. CRAGLSKE (9) ; ces auteurs obtiennent souvent des résultats peu précis qui ne permettent pas d'observer les variations de chute de pression de l'air dues à la présence du film de liquide. L'étude la plus détaillée et la plus précise est celle rapportée par K. FEIND (4) qui propose la relation expérimentale suivante :

$$\frac{\Delta P}{Z} = 0,0625 \frac{\eta_G^2}{\rho_G} \frac{Re_G^2}{(R - \delta_o)^3} \left(\frac{120}{D \frac{5}{3}} + \frac{0,14}{D^{1,5}} \right)$$

avec
$$D = C \frac{Re_G}{Re_L^n} \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{\frac{2}{5}} \left(\frac{\eta_G}{\eta_L} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\delta_o}{R} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Outre cette relation donnant les variations de $\frac{\Delta P}{Z}$ en fonction des paramètres étudiés, l'influence de la longueur d'écoulement du film qui est liée à la variation de la hauteur du sommet de vague en fonction de ce paramètre est également considérée. L'ordre de grandeur des chutes de pression mesurées est de quelques millimètres de colonne d'eau par mètre de tube.

I - III . 3 Limites de refoulement du film ruisselant.

On appelle généralement limites de refoulement du film ruisselant les conditions pour lesquelles se produit la première formation

de gouttes entraînées dans le courant central du gaz ou la première formation d'anneaux liquides ayant un mouvement ascendant à la surface du film. Cette définition utilisée par K. FEIND (4) ne rend pas compte de tous les cas qui peuvent limiter l'écoulement d'un film ruisselant en présence d'un contre-courant central de gaz. Sans faire une étude détaillée de tous les cas possibles, cet auteur rapporte les observations suivantes : pour les tubes de petit diamètre et pour les fortes épaisseurs de film, à un débit d'air déterminé, il se forme des bouchons de liquide qui remplissent toute la section du tube alors que dans les tubes de grand diamètre le liquide est refoulé le long de la paroi du tube ; la formation des bouchons de liquide se ferait de la façon suivante : au débit d'air où commence l'engorgement, il y a, pour un petit tube, formation et entraînement de gouttelettes de liquide dans le courant d'air, la pression du gaz sous une gouttelette monte jusqu'à ce que la goutte soit soufflée à l'extérieur du tube ; si la pression du gaz ne suffit pas, le liquide refoulé s'accumule jusqu'à ce qu'il puisse couler vers le bas sous l'action de la pesanteur ; la section du tube devient à nouveau libre pour le passage du gaz, la pression du gaz baisse, sa vitesse augmente, on a alors une nouvelle accumulation du liquide ; on est en présence d'un écoulement pulsé du gaz et du liquide dans le tube.

L'endroit où le refoulement du liquide apparaît se situe là où la hauteur du sommet de vague est la plus forte, c'est-à-dire là où la section de passage du gaz est la plus faible ; d'après les résultats de H. BRAUER (5), qui seront rapportés plus loin, sur la variation de la hauteur du sommet de vague en fonction de la longueur d'écoulement du film, l'apparition de l'engorgement se fera à l'extrémité inférieure du tube, là où le gaz est introduit.

D'autre part, la forme de l'extrémité inférieure du tube a une importance déterminante sur les limites de refoulement du film.

K. FEIND (4) relie les nombres de REYNOLDS du gaz et du liquide pour lesquels on est aux limites du refoulement par la relation suivante :

$$Re_G = \frac{1,4 \cdot 10^4}{k} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{\frac{2}{5}} \left(\frac{\eta_L}{\eta_G} \right)^{\frac{3}{4}} Re_L^m \left[0,093 \left(\frac{R}{\delta} \right)^{\frac{5}{4}} - 1 \right]$$

relation valable pour $\frac{R}{\delta} > 8$

m et k prennent des valeurs déterminées pour chacun des domaines définis précédemment.

ZHIVAIKIN (10) a également fait des recherches sur l'entraînement d'eau par l'air pour des films de faible épaisseur par rapport au diamètre du tube ; il définit une vitesse critique v_{cr} du gaz pour laquelle apparaît l'entraînement de liquide, fonction du débit du liquide et de ses propriétés physiques :

$$v_{cr} = f(\ell, \eta_L, \rho_L, \sigma_L)$$

Pour résoudre cette équation, l'auteur propose la relation sans dimension suivante :

$$P = A Re_L^n$$

Cette relation est établie par analyse dimensionnelle.

$P = \frac{v_{cr} \eta_L}{\sigma_L}$ caractérise l'interaction entre le gaz et le liquide. Cet auteur obtient le résultat suivant : il existe une zone où le courant gazeux a un effet négligeable sur les conditions critiques, le débit liquide étant le paramètre déterminant. Dans le cas d'un film de faible épaisseur, cette zone s'étend jusqu'à une vitesse de l'air

de 2 à 3 m/s. Une explication de ces résultats par l'existence des vagues à la surface de film n'est pas recherchée dans ces travaux.

I - 111 . 4 Conclusion.

Ce rappel rapide des résultats obtenus par les différents auteurs sur les colonnes à film tombant nous permet d'évaluer l'importance des différents paramètres et surtout des conditions expérimentales, telles que mode d'introduction du liquide dont dépend l'uniformité de la distribution des vitesses dans une même section, forme de l'extrémité inférieure du tube etc...

On a pu constater que seul le cas de film liquide de faible épaisseur par rapport au rayon du tube a été étudié de façon approfondie ; toutefois K. FEIND (4) note que, dans un tube de 20 mm de diamètre, au débit d'air où commence l'engorgement, il y a formation de bouchons de liquide occupant toute la section du tube alors que dans un tube de 50 mm de diamètre, le refoulement du liquide se fait le long de la paroi du tube.

On rappelle enfin qu'à notre connaissance aucune étude n'a été faite sur une colonne à film tombant d'un diamètre inférieur à 12 mm.

I - 112 Etude des propriétés locales d'un film ruisselant.

Dans un travail de recherche sur le transfert de chaleur à travers un film liquide, H. BRAUER (5) étudie l'existence et les caractéristiques des rides à la surface du film ; il mesure la hauteur du sommet des rides, l'épaisseur de film au niveau du creux des vagues, la fréquence des vagues en fonction du nombre de Reynolds du liquide,

de la viscosité, de la longueur d'écoulement du film. Ces mesures sont effectuées à l'aide d'un appareil constitué d'un stylet faisant partie d'un circuit électrique. Ce stylet est placé à une distance déterminée de la paroi du tube ; chaque fois qu'une vague de hauteur donnée passe, il se produit une impulsion de tension, qui est comptée par un appareil électronique. Les résultats montrent que la hauteur du sommet de vague croît lorsque la viscosité du liquide croît et également lorsque la longueur d'écoulement du film croît.

M.L. JACKSON (11) étudie également les propriétés locales de l'écoulement d'un film tombant ; il utilise un traceur radioactif. L'activité émise par le liquide est mesurée avec un compteur GEIGER MULLER placé au centre du tube. Cette méthode permet d'obtenir simultanément l'épaisseur de la couche laminaire a avant le passage de la vague, la hauteur du sommet de vague c et l'épaisseur de la sous-couche laminaire b au moment du passage de la vague. Dans un tube de 35 mm de diamètre pour un nombre de Reynolds $Re_L = 640$, l'auteur obtient avec de l'eau

$$a = 0,30 \text{ mm}$$

$$b = 0,23 \text{ mm}$$

$$c = 0,74 \text{ mm}$$

D'après M.L. JACKSON (11) la tension superficielle n'est pas un facteur intervenant dans la formation des vagues ni dans l'écoulement du film en présence de vagues. Le critère d'apparition des vagues ne sera pas le nombre de WEBER mais le nombre de FROUDE :

$$\frac{u_L}{(g_a \delta)^{1/2}}$$

l'apparition des vagues se ferait pour un nombre de FROUDE supérieur à 1.

Des résultats sur la hauteur du sommet de vague sont éga-

lement obtenus par KIRKBRIDE (12) à l'aide d'un micromètre ; cet auteur a obtenu des valeurs égales à plusieurs fois l'épaisseur moyenne de film calculée pour un écoulement laminaire sans ride.

Les vitesses superficielles du film sont également étudiées par ces auteurs ; la force exercée par le poids de la vague à la limite de la sous-couche laminaire accroît la vitesse superficielle du film.

D'autre part, FRIEDMAN et MILLER (13) obtiennent le résultat suivant : si la paroi du tube s'écarte de la position verticale dans le rapport de 1 pour 600, la vitesse locale du film peut être augmentée de 200 % par rapport à sa valeur si la paroi était rigoureusement verticale.

I - 113 Etude des critères de stabilité de l'écoulement annulaire.

Les auteurs qui ont étudié les propriétés des colonnes à film tombant n'ont pas cherché à élucider le processus d'engorgement ils ont généralement porté sur des graphiques les débits de gaz et de liquide d'engorgement correspondant à des conditions déterminées, en se limitant au cas de films minces par rapport au rayon du tube.

Par contre les auteurs qui ont étudié l'écoulement à deux phases à co-courant ascendant ou descendant cherchent à interpréter et à prévoir les conditions pour lesquelles on a un changement de mode d'écoulement. Ils ont étudié en particulier le passage de l'écoulement annulaire à l'écoulement par pistons. Ce problème est abordé soit dans des recherches globales sur l'écoulement annulaire soit dans des études expérimentales ou théoriques sur l'instabilité des films liquides dans l'écoulement à deux phases.

ANDERSON et MANTZOURANIS (14) étudient l'épaisseur de film et le gradient de pression pour un écoulement à deux phases ascendant dans un tube de 12,3 mm de diamètre ; ils portent sur un graphique y_1^+ en fonction de w^+ pour différentes valeurs de Re^* où :

$$y_1^+ = \frac{\rho_L u^* y_i}{\eta_L} \quad y_i = \text{distance à la paroi du tube.}$$

$$u^* = \left(\frac{\tau_w}{\rho_L} \right)^{1/2}$$

$$w^+ = \frac{w_L}{2 \pi r_w \eta_L} \quad \tau_w = \text{contrainte à la paroi.}$$

$$Re^* = \frac{\rho_L r_w u^+}{\eta_L} \quad r_w = \text{rayon du tube.}$$

$$w_L = \text{vitesse du liquide.}$$

Ils constatent que pour une valeur w^+ donnée, y_1 n'est défini que pour une valeur de Re^* suffisamment grande ; il existe une valeur critique de Re^* pour laquelle y_1 n'est plus défini, c'est-à-dire pour laquelle se produit la transition écoulement annulaire écoulement par pistons. Ces auteurs proposent alors de prendre comme critère de stabilité le nombre Re^* ; les remarques suivantes sont faites : dans l'écoulement à deux phases à co-courant ascendant la contrainte de frottement à la paroi décroît de façon continue quand le débit d'air décroît, Re^* approche alors rapidement de sa valeur critique ; pour un débit liquide donné, Re^* atteint sa valeur critique pour un débit d'air nettement inférieur à celui pour lequel le gradient de pression est minimal, ce minimum ne correspond pas à un changement de mode d'écoulement. Pour de faibles débits de liquide et de gaz, pour $Re^* < Re^*$ critique, c'est-à-dire dans le domaine de l'écoulement par pistons, on trouve des contraintes à la paroi négatives malgré un écoulement positif du liquide, ce qui montre qu'à la

paroi le liquide s'écoule vers le bas alors qu'au centre du tube il s'écoule vers le haut.

Après avoir rappelé la suggestion faite par NICKLIN et DAVIDSON (15) de considérer la limite supérieure de l'existence de l'écoulement par pistons comme le résultat de l'instabilité du film liquide s'écoulant vers le bas à l'extérieur de la bulle d'air, G.B. WALLIS (16) rapproche cette transition, entre les écoulements annulaire et par pistons, et les limites du domaine d'un écoulement d'un film de liquide tombant et d'un contre-courant central de gaz, au sens défini précédemment ; pour représenter ces dernières l'auteur propose la relation suivante :

$$V_L^*{}^{1/2} + V_G^*{}^{1/2} = C$$

$$\text{avec } V_G^* = V_G \rho_G^{1/2} \left[g_a D (\rho_L - \rho_G) \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$V_L^* = V_L \rho_L^{1/2} \left[g_a D (\rho_L - \rho_G) \right]^{-\frac{1}{2}}$$

V_G , V_L sont respectivement les vitesses du gaz et du liquide.

D est le diamètre du tube.

C est une constante dépendant du mode d'introduction et d'évacuation du gaz et du liquide ; en éliminant les effets de bout et toute cause extérieure d'instabilité on obtient $C = 1$. D'autre part si, après avoir dépassé la limite de stabilité, c'est-à-dire après s'être trouvé en présence d'un film très agité, on revient à la limite de stabilité, on obtient une valeur différente pour C . L'auteur conclut que dans un certain domaine le mode d'écoulement obtenu pour certaines conditions dépend du chemin suivi pour atteindre ces conditions.

Entre les domaines d'écoulement par pistons et annulaire existe un domaine où la surface du film est violemment agitée, l'écoulement de la partie lisse du film se fait vers le bas alors que les vagues à la surface se déplacent vers le haut; l'écoulement global résulte de la combinaison de ces deux processus ; G.B. WALLIS (16) propose de prendre comme limite inférieure de l'écoulement annulaire ascendant le point où il n'existe plus de mouvement de liquide vers le bas c'est-à-dire le point de la limite d'écoulement d'un film à contre-courant d'un gaz pour une vitesse du liquide nulle, ce qui donne la relation :

$$V_G = C^2 \left[\varepsilon_a D (\rho_L - \rho_G) \right]^{1/2} \times \rho_G^{-\frac{1}{2}}$$

C^2 dépendant du chemin suivi est compris entre 0,8 et 1 lorsque les effets de bout sont éliminés.

Nous rapprocherons les observations faites par G.B. WALLIS (16) sur le domaine séparant les domaines d'écoulement annulaire et par pistons des conditions caractérisées par l'absence d'écoulement global du liquide étudiées par E.Q. BASHFORTH, J.B.P. FRASER, H.P. HUTCHISON et R.M. NEDDERMAN (17) qui sont les seuls auteurs à avoir étudié ces conditions limites entre les écoulements à contre-courant et à co-courant. Si une quantité d'eau est introduite dans un tube vertical à l'état de film en présence d'un courant d'air, trois cas sont possibles :

- pour les faibles vitesses de l'air, le liquide s'écoule vers le bas sous l'action de la pesanteur.

- pour les fortes vitesses de l'air, le liquide est refoulé à l'extérieur du tube.

- pour une gamme importante de débits d'air, le liquide rest à la surface intérieure du tube sous forme de film de longueur bien définie.

Les débits d'air extrêmes pour lesquels on obtient ce film de liquide en équilibre dépendent de la nature du liquide et de celle du gaz et des caractéristiques du tube ; notons que ces auteurs éliminent les effets de bout puisque l'air s'écoule sur une certaine distance dans le tube sec avant d'entrer en contact avec le film liquide ; d'autre part ces expériences sont faites pour une faible épaisseur de film devant le rayon du tube. Remarquons que la configuration du liquide pour la limite inférieure de la gamme des débits d'air n'est pas celle qui résulterait d'une transition entre écoulement par pistons et écoulement annulaire.

Cette remarque est importante ; en effet S. CALVERT et B. WILLIAMS (18) dans une étude sur l'écoulement annulaire à co-courant gaz-liquide décomposent la force exercée par le gaz sur le liquide en deux termes :

- un terme de frottement à l'interface gaz-liquide ; le gaz s'écoule lentement à l'interface et sa vitesse croît vers le centre du courant gazeux.

- un terme de poussée : le gaz qui s'écoule à grande vitesse exerce une poussée sur les vagues à la surface du film liquide et perd une partie de son énergie cinétique. L'aire de la section des vagues détermine l'aire de poussée, leur forme et leur distance déterminent un coefficient de poussée.

Le terme de frottement est déterminé comme dans le cas des écoulements à une phase dans les tuyaux lisses en utilisant un facteur de frottement.

Le terme de poussée sur les vagues nécessite une connaissance de la vitesse du gaz qui agit sur la section de poussée, de l'aire de cette section et du coefficient de poussée.

Ces auteurs proposent pour le calcul de la chute de pression de l'air dans un écoulement annulaire ascendant à co-courant la relation suivante :

$$\Delta P_W = \Delta P_E + \Delta P_D$$

ΔP_D est la chute de pression de l'air dans le tube sec.

ΔP_E est la chute de pression de l'air due à la poussée exercée sur les vagues du liquide

$$\Delta P_E = C_D \left(\frac{u_G^2 \rho_G A_D}{2 g_a} \right) \frac{2 Z}{R}$$

A_D est l'aire de la section de la vague.

C_D est le coefficient de poussée.

Le produit $A_D C_D$ est déterminé expérimentalement en fonction de l'épaisseur de film et de la vitesse du courant gazeux.

L'interprétation de la force de poussée du gaz sur un film liquide ascendant est également recherchée par LAIRD (19) qui étudie expérimentalement l'influence des paramètres caractérisant le mouvement des vagues à la surface de film sur la force de poussée du gaz : longueur d'onde et fréquence.

Les expériences de LAIRD (19) sont faites avec des tubes en caoutchouc, une perturbation périodique est imposée à l'interface gaz-liquide ; k étant la période de la perturbation, a le rayon de la colonne de gaz l'auteur propose le produit ka comme paramètre d'instabilité du film liquide ; il y a passage de l'écoulement annulaire à l'écoulement par pistons lorsque la force due à la contrainte interfaciale devient inférieure à la force de pesanteur s'exerçant

sur le liquide ; ceci se produit lorsque le nombre de REYNOLDS du gaz diminue ; l'écoulement du gaz devenant plus stable, le paramètre d'instabilité relatif aux rides à la surface du film a son effet maximal.

S. OSTRACH et A. KOESTEL (20) soulignent le désaccord qui existe entre les différents auteurs sur le choix du paramètre déterminant pour l'instabilité des films liquides en écoulement en présence d'un courant d'air ; KINNEY et KNUTH (21) choisissent le nombre de REYNOLDS du liquide et prétendent que le nombre de REYNOLDS du gaz n'a aucune influence sur la stabilité du film, alors que DUKLER et LAIRD font un choix opposé. Ces auteurs reconnaissent toutefois que le changement de mode d'écoulement est lié à l'existence des vagues à la surface du film.

Pour OSTRACH et KOESTEL (20) il existe quatre types d'instabilités, qui, seules ou combinées, peuvent conduire à un écoulement ondulé et à un changement de mode d'écoulement :

- l'instabilité de TOLLMIEH SCHLICHTING qui est le résultat de l'amplification, due à l'existence d'un gradient de vitesse, de perturbations infinitésimales lorsque le fluide est dans le domaine de transition laminaire turbulent. Le critère d'instabilité est un nombre de REYNOLDS critique.

- l'instabilité de KELVIN HELMHOLTZ qui existe lorsque les différentes couches d'un fluide hétérogène sont en mouvement l'une par rapport à l'autre ; la viscosité est négligée, le nombre de REYNOLDS n'est plus un paramètre déterminant, c'est le nombre de RICHARDSON $J = - \frac{g_a \, d \, \rho_L}{d \, z} \bigg/ \rho_L \left(\frac{d \, u_L}{d \, t} \right)^2$ qui est choisi comme critère de stabilité. Cette instabilité est due à l'accumulation

d'énergie cinétique dans le mouvement relatif entre les différentes couches.

- Instabilité de RAYLEIGH TAYLOR : instabilité à l'interface de deux fluides de densité différente, accélérés l'un par l'autre.

- Instabilité de BENARD qui se manifeste lorsqu'un fluide homogène est dans un état tel que les particules de fluide les plus lourdes soient au-dessus des particules les plus légères dans le champ de la pesanteur ; le fluide tend à se redistribuer. L'instabilité apparaît lorsque l'équilibre entre le gradient de densité et les forces de viscosité est dépassé.

Les causes de ces quatre types d'instabilité existent pour des films plans, non limités perpendiculairement à leur surface ; il n'est pas tenu compte des interactions entre les différentes parties du liquide lorsqu'il s'écoule à l'intérieur d'un tube, interactions qui ont une grande importance ; les auteurs se proposent alors d'étudier les conditions de rupture d'un film en écoulement annulaire. Ils posent le problème de la façon suivante : étant donné une vague à la surface d'un film, calculer la longueur pour laquelle on aura rupture de film ; deux types de rupture sont possibles : rupture par arrachement de gouttelettes au sommet des vagues de liquide et rupture par formation d'un piston liquide. L'équation suivante est établie :

$$\frac{d B}{B} = \frac{\alpha' F_{\max} (N_{RL} - N_{RLn})}{(C_R/u_2 + 1) \delta} d L$$

L longueur d'écoulement du film.

B amplitude maximale de la vague par rapport à la surface lisse.

$F_{\max}$ est une fonction $f\left(\frac{\rho_G}{\rho_L}, \frac{\eta_L}{\eta_G}\right)$

δ épaisseur de film.

$$\alpha' = \frac{2 \pi \delta}{\lambda} \quad \text{où } \lambda \text{ est la longueur d'onde.}$$

$$N_{RL} = \frac{u_2 \rho_L \delta}{\eta_L} \quad \text{nombre de Reynolds.}$$

$$u_2 = \text{vitesse superficielle du liquide.}$$

$$C_R \text{ est la partie réelle de la vitesse de propagation.}$$

Dans le cas où la rupture du film liquide se traduit par la formation de pistons de liquide, on intègre l'équation proposée avec pour L et B les limites d'intégration suivantes :

$$L = 0 \quad \text{et} \quad L = L^*$$

L^* étant la longueur d'écoulement pour laquelle il y a rupture du film.

$$B = B_1 \quad \text{et} \quad B^* = \frac{D}{2} - \delta$$

B_1 étant l'amplitude initiale de la vague et D le diamètre du tube.

Dans le cas où la rupture du film liquide se traduit par l'arrachement de gouttelettes, on intègre l'équation proposée avec pour L les mêmes limites que dans le cas précédent et pour B les limites suivantes :

$$B = B_1 \quad \text{et} \quad \frac{B^*}{\delta} \neq 1$$

Si la valeur obtenue pour L^* correspondant à la formation de pistons de liquide est plus grande que L^* correspondant à la formation de gouttes, on peut encore avoir la formation de pistons si les gouttes formées occupent la section de passage du gaz.

I - 114 Conclusion.

Si cette étude bibliographique ne doit pas nous permettre de rendre compte quantitativement de nos résultats à l'aide des relations expérimentales proposées par les différents auteurs, elle nous permet d'en rendre compte qualitativement. On pourra montrer que les observations que nous avons faites sur les propriétés de l'écoulement gaz-liquide dans un tube sont en accord avec les observations faites par les différents auteurs précédemment cités. Notre but n'est pas d'étudier les propriétés de l'écoulement gaz-liquide dans un tube, mais de les connaître afin de pouvoir utiliser les résultats obtenus pour interpréter le fonctionnement d'un faisceau de 126 tubes identiques montés en parallèle.

I - 12 DISPOSITIF EXPERIMENTAL.

I - 121 Choix des dimensions et de la forme des extrémités du tube.

Le choix du tube expérimental ne fut pas déterminé pour réaliser une étude sur les propriétés d'une colonne à film tombant de 6,5 mm de diamètre intérieur, mais ce tube fut choisi pour être l'élément d'un faisceau de nombreux tubes identiques, faisceau qui sera considéré comme un garnissage de type particulier ; ce garnissage constitué par un faisceau de tubes montés en parallèle devait prendre place dans une colonne existante de dimensions déterminées et avoir des propriétés qui permettraient un approfondissement des connaissances sur le mode de fonctionnement des garnissages couramment utilisés, en particulier du garnissage d'anneaux Raschig de 10 mm soit 6,5 mm de diamètre intérieur étudié par B. LESPINASSE. En conséquence, tous les tubes expérimentaux utilisés au cours de nos manipulations furent pris dans un même lot de tubes en pyrex dont les caractéristiques sont les

mêmes que celles des tubes qui ont servi à la fabrication des anneaux Raschig.

Leur diamètre n'est pas rigoureusement constant sur toute la longueur du tube ; l'ordre de grandeur de ses variations est de 4 %. D'autre part, ces tubes ne sont pas rigoureusement droits.

La longueur des tubes fut choisie en considérant l'ordre de grandeur de la longueur des tubes généralement utilisés dans les études sur colonnes à film tombant et les dimensions de la colonne où devait être monté le faisceau de tubes. La longueur de chaque tube fut ainsi ramenée à $100,5 \text{ cm} \pm 0,2$.

Les différentes solutions adoptées dans les recherches sur les colonnes à film tombant pour l'évacuation du liquide sont représentées sur la figure I.121.A. Dans les cas a et b, le liquide quitte le tube sous forme de film, la section de passage du gaz à son entrée dans le tube n'est pas modifiée par l'écoulement du liquide hors du tube. Dans les cas d et e qui ne diffèrent que par la direction d'arrivée du courant gazeux, le liquide s'accumule à la base du tube et forme ainsi un bourrelet avant de quitter le tube goutte à goutte, l'écoulement du gaz se trouve donc fortement perturbé à son entrée dans le tube. Dans le cas c le liquide s'accumule à la partie inférieure du biseau avant de couler goutte à goutte ; cette formation de gouttes à la base du tube perturbe encore l'écoulement du gaz à ce niveau mais la section libre pour le passage du gaz est dans ce cas plus grande que dans les cas d et e.

Les solutions hydrodynamiquement les meilleures, qui furent adoptées par K. FEIND (4), sont celles représentées par les formes a et b ; les plus mauvaises, qui furent utilisées par R. KRAUSE (25) et HOLMES (26), sont celles représentées par les formes d et e. Dans

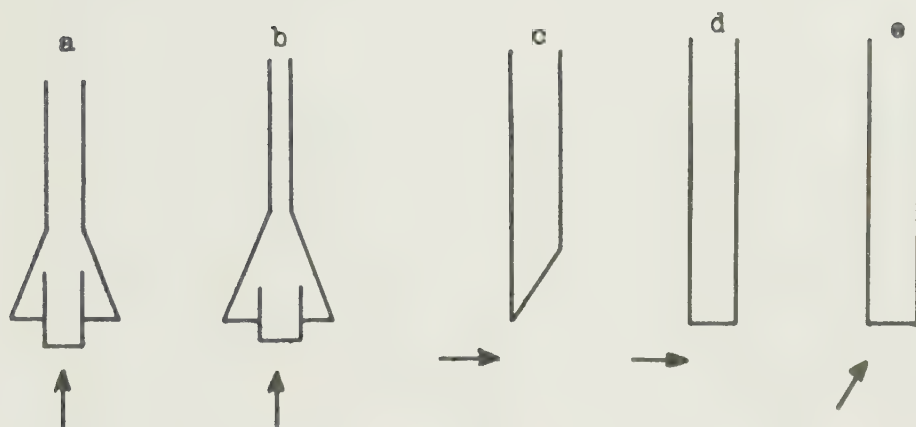


Figure I.121 A
 (Les flèches indiquent la direction d'arrivée
 du courant gazeux)

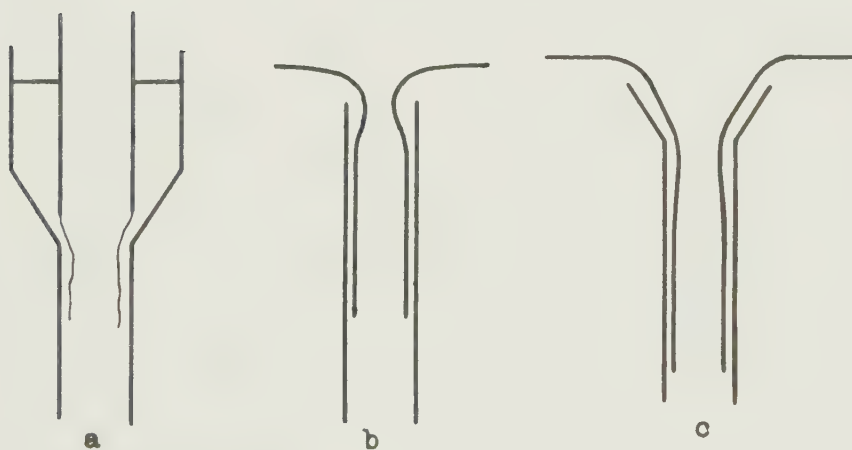


Figure I.121 B

notre cas nous avons dû choisir la solution c car il n'était pas possible de réaliser le montage du faisceau de tubes avec les dispositifs a ou b.

La perturbation causée par l'accumulation du liquide avant son écoulement sous forme de gouttes a un effet important sur les limites du mode d'écoulement "film liquide ruisselant - contre-courant central de gaz". K. FEIND (4) rapporte le résultat suivant obtenu dans des conditions particulières : le nombre de Reynolds correspondant à la limite de refoulement peut être augmenté de 65 % lorsqu'on adopte un dispositif a au lieu d'un dispositif e.

Le problème de l'introduction du liquide fut résolu dans les études sur colonne à film tombant par les solutions a, b et c représentées sur la figure I.121.B. Il est évident que la solution a, irréalisable dans notre cas, est la meilleure puisqu'elle permet par un réglage de la fente annulaire d'obtenir une répartition uniforme des vitesses du liquide sur toute la circonférence de l'entrée du tube, possibilité qui présente un intérêt considérable, en effet un écart à l'uniformité des vitesses du liquide modifie sensiblement les propriétés du film en particulier les caractéristiques des vagues à la surface. La solution b est mauvaise étant donné la formation du bourrelet de liquide qui conduit à la formation de bouchons à des débits d'autant plus faibles que le diamètre du tube est plus petit. La solution c qui fut adoptée dans notre cas limite considérablement cette formation de pistons de liquide à son entrée dans le tube.

Dans la détermination des caractéristiques géométriques du tube expérimental utilisé pour notre travail, nous avons dû adopter une solution de compromis entre la nécessité de réaliser un faisceau de tubes montés en parallèle et les qualités hydrodynamiques optimales recherchées pour une étude de colonne à film tombant.

I - 122 Description du dispositif expérimental.

La figure I.122 représente schématiquement l'installation expérimentale sommaire qui fut montée pour l'étude des caractéristiques de l'écoulement à deux phases dans le tube décrit précédemment ; elle permet :

- la détermination des domaines d'existence des différents modes d'écoulement en fonction des débits de gaz g et de liquide l .
- la mesure de la chute de pression de l'air.
- la mesure du débit d'air entraîné par un écoulement d'eau dans des conditions déterminées.

L'alimentation en eau est faite par un bac en charge à niveau constant ; le débit d'eau est mesuré à l'aide d'une série de rotamètres dont les gammes permettent la mesure de débits allant de $0,03 \text{ cm}^3/\text{s}$ à $100 \text{ cm}^3/\text{s}$. L'évacuation du liquide se fait par l'intermédiaire d'un siphon désamorcé qui maintient la garde de liquide suffisante pour que l'air ne puisse s'échapper à ce niveau.

L'air est pris sur une conduite d'alimentation générale en air comprimé du laboratoire. Son débit est mesuré avec une série de rotamètres permettant de mesurer des débits allant de $10 \text{ cm}^3/\text{s}$ à $2000 \text{ cm}^3/\text{s}$. Deux arrivées d'air sont prévues permettant de réaliser des expériences à contre-courant et à co-courant air-eau.

La chute de pression de l'air est mesurée à l'aide d'un manomètre en U rempli d'eau dont les branches sont reliées à des prises de pression situées sur chacun des pots où débouchent les extrémités du tube.

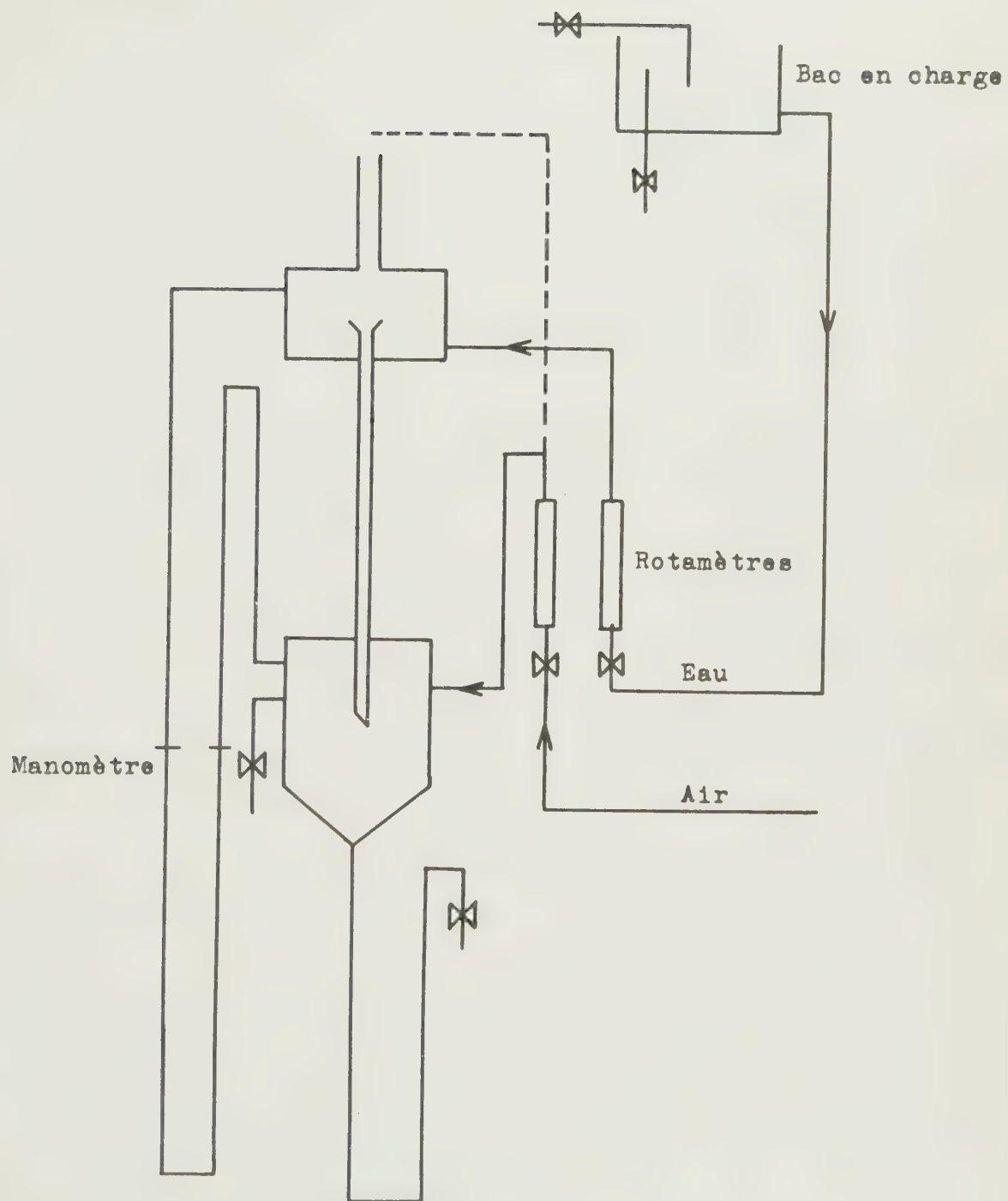


Figure I.122

I - 13 RESULTATS EXPERIMENTAUX.

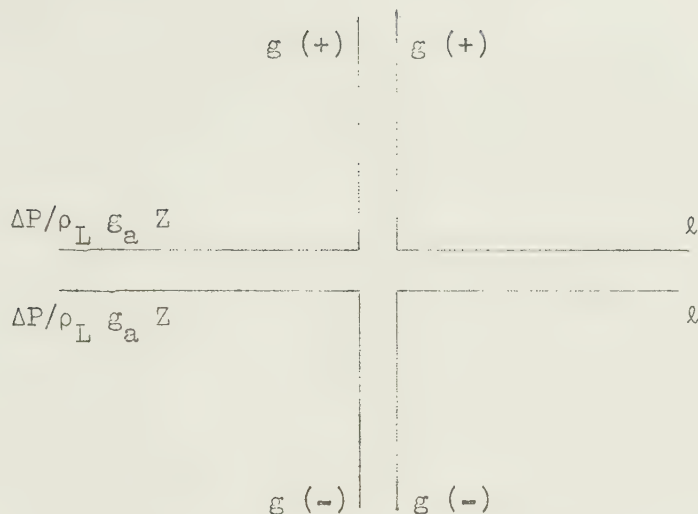
Nous nous sommes proposés d'étudier les propriétés de l'écoulement à deux phases dans un tube placé dans les conditions de fonctionnement les plus voisines possibles de celles où se trouve l'un quelconque des 126 tubes du faisceau. Tous les résultats obtenus sur un tube avec le dispositif expérimental décrit précédemment ne seront évidemment pas à retenir pour l'interprétation des propriétés de l'écoulement à deux phases dans le faisceau de tubes.

Comme nous le verrons plus loin, les résultats obtenus avec un tube devront être complétés par les résultats obtenus avec deux tubes montés en parallèle.

Nous obtenons quatre séries de résultats :

- Différents états pris par le système en fonction des débits l et g de liquide et de gaz.
- Etude de l'écoulement d'air dans un tube parfaitement mouillé
- Entraînement d'air par un écoulement d'eau.
- Chutes de pression subies par l'air pour chaque état du système.

Les débits d'air sont comptés positivement lorsque l'air s'écoule dans les tubes de bas en haut et négativement dans le cas contraire. L'ensemble des résultats obtenus sera représenté sur un diagramme unique à quatre quadrants, schématisés ci-dessous ; ceci justifie la présentation des résultats des différentes séries d'expériences sur des diagrammes partiels à "l'envers".



I - 131 Diagramme des différents états pris par le système.

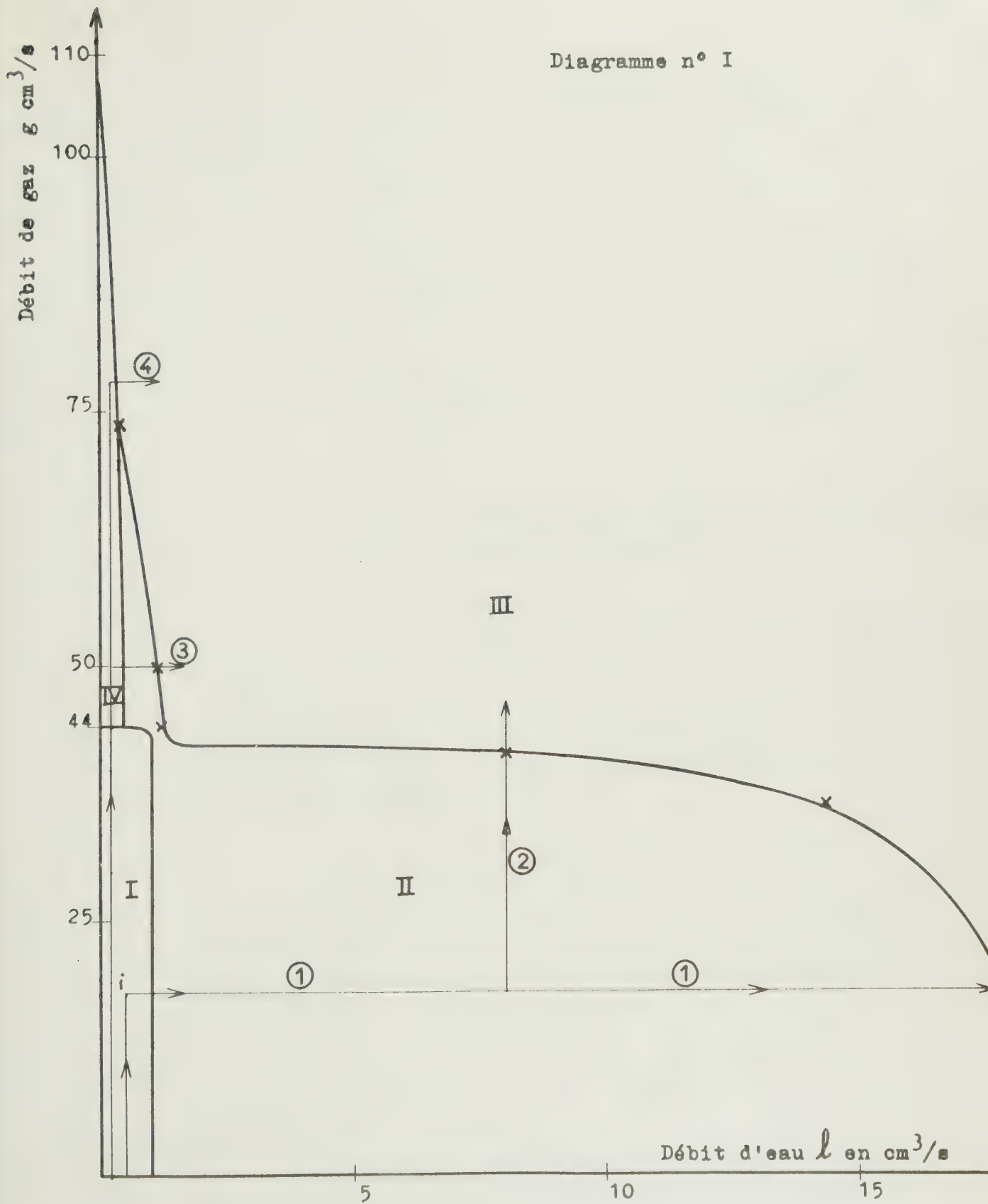
Le système étudié (cf. fig. I.122) comprend un tube et deux pots d'alimentation : un pot supérieur où est introduit le liquide qui s'écoule par déversement à l'intérieur du tube ; un pot inférieur fermé où est introduit l'air qui s'écoule à l'intérieur du tube de bas en haut.

Au cours des expériences, on fait varier les débits l et g de liquide et de gaz et on observe la nature de l'écoulement des deux phases ; on détermine ainsi les limites des domaines à l'intérieur desquels existe un mode d'écoulement donné. Sur les différents diagrammes obtenus une expérience pourra être représentée par un chemin fléché.

Le système peut normalement se placer dans quatre états différents (voir diagramme n° I graphique I.131 a) :

- Domaine n° I : Ecoulement continu d'un film ridé et d'un contre-courant central de gaz.

- Domaine n° II : Ecoulement périodique de pistons de liquide vers le bas et de bulles de gaz vers le haut.



Graphique I.131 a

- Domaine n° III : Accumulation de liquide dans le pot supérieur.

- Domaine n° IV : "Bullage".

Il existe un cinquième état qui ne peut être obtenu que grâce à une procédure particulière (voir diagramme n° II graphique I.131 b)

- Domaine n° V : Ecoulement continu de filet de liquide lisse et de contre-courant de gaz dans la partie libre du tube.

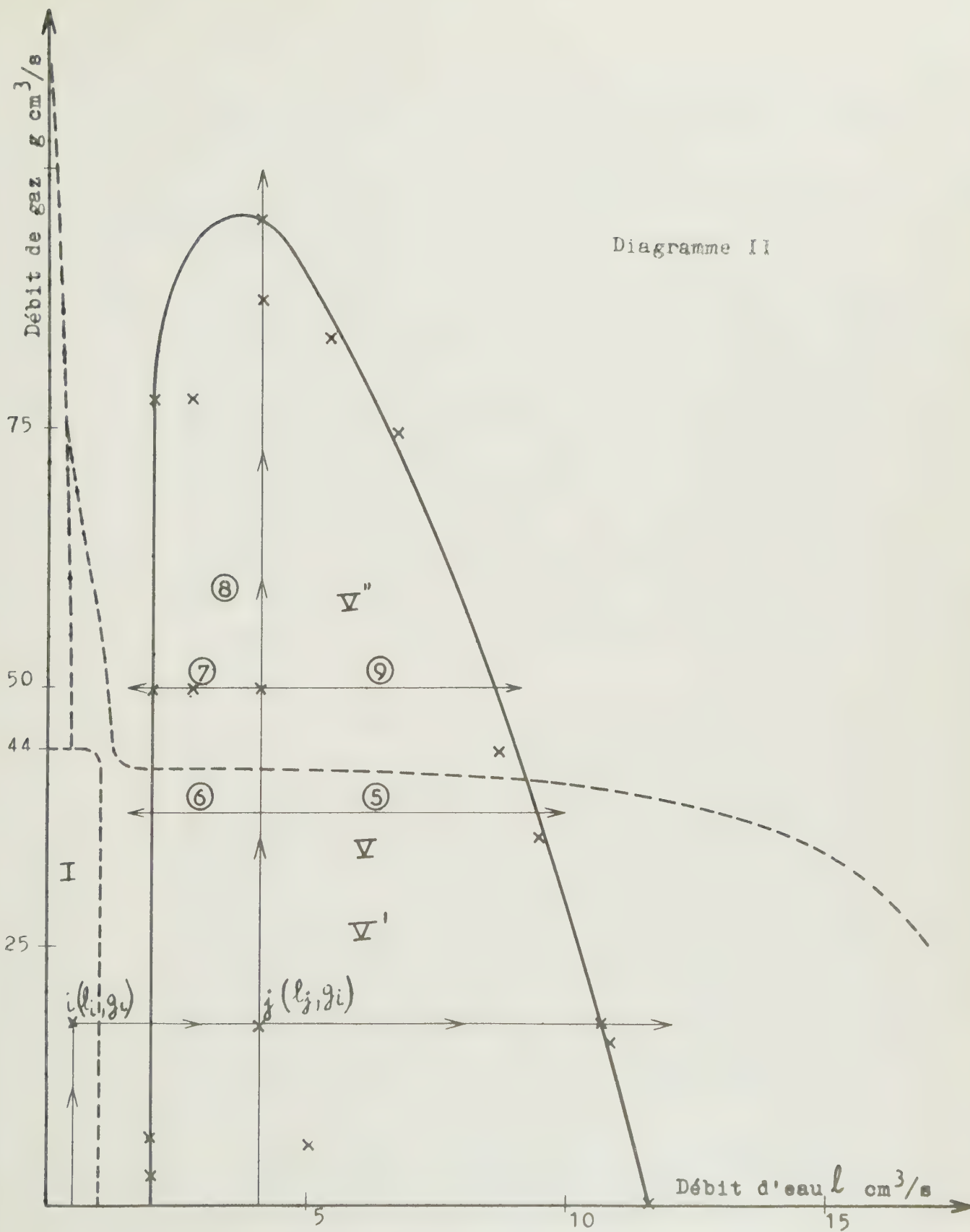
I - 131 . 1 Domaine n° I : Ecoulement continu d'un film
ridé et d'un contre-courant central de gaz.

Ce domaine correspond aux conditions normales de fonctionnement des colonnes d'absorption à film tombant ; il existe pour les faibles débits de liquide et de gaz. Il est limité par le domaine n° II d'écoulement périodique de pistons de liquide et de bulles de gaz et par le domaine n° IV du bullage ; ces modes d'écoulement seront décrits ultérieurement.

Comme nous l'avons souligné pour le choix de la forme de l'extrémité inférieure du tube expérimental, l'accumulation de liquide au sommet et la formation de gouttes au niveau où le liquide quitte le tube, ont une importance déterminante sur les limites du domaine n° I.

La frontière de ce domaine présente les caractéristiques suivantes :

- Il existe une zone, pour un débit d'air inférieur à $44\text{cm}^3/\text{s}$ où le changement de mode d'écoulement ne dépend pas du débit d'air.



Graphique I.131 b

- Il existe une zone, pour un débit d'air égal à $44 \text{ cm}^3/\text{s}$, où le changement de mode d'écoulement ne dépend pas du débit d'eau.

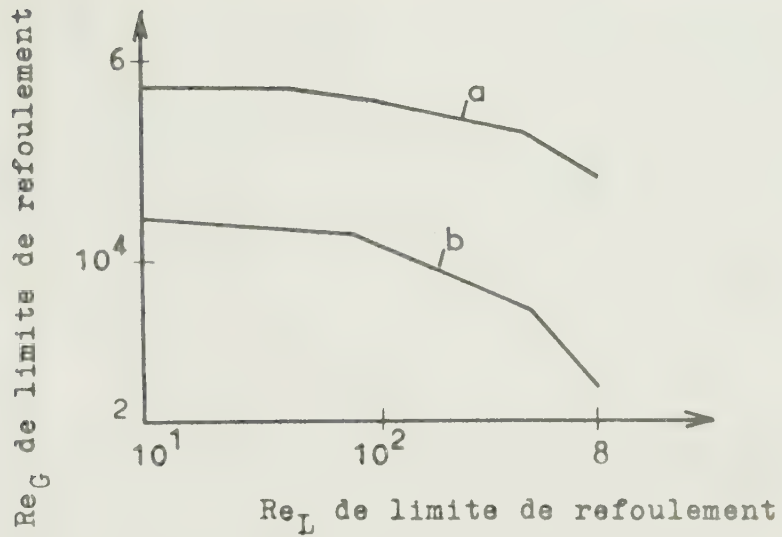
Ce résultat est qualitativement en accord avec les résultats suivants :

- ZHIVAIKIN (10) dans ses recherches sur l'entraînement de gouttelettes à la surface d'un film de faible épaisseur par rapport au diamètre du tube, montre qu'il existe une zone où le courant gazeux a un effet négligeable sur les conditions pour lesquelles apparaît l'entraînement du liquide, le débit de liquide étant le paramètre déterminant. D'après S. OSTRACH et A. KOESTEL (20), l'arrachement de gouttelettes se produit pour une certaine hauteur du sommet de vague à la surface du film ; cette hauteur du sommet de vague n'étant pas influencée par un faible courant gazeux et ne dépendant que du débit d'eau, il est normal que l'apparition de l'entraînement de gouttelettes ne dépende que du débit d'eau pour un débit d'air faible.

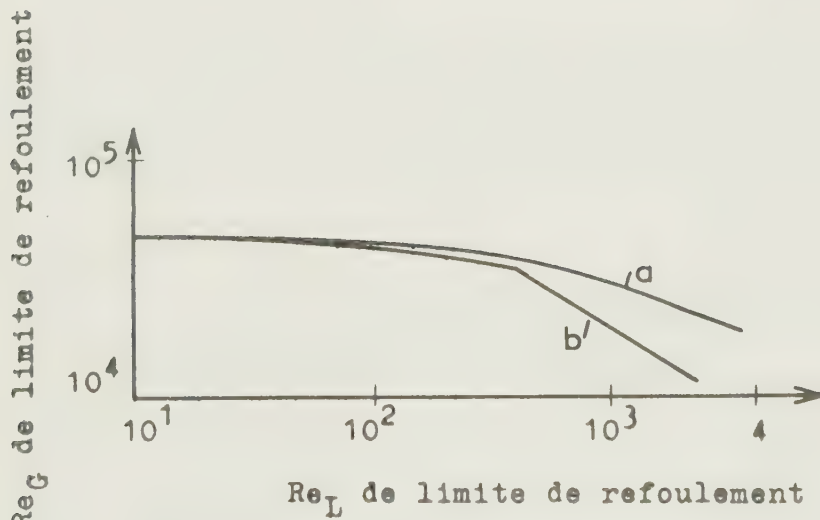
- L'évolution de l'allure des courbes (cf. fig. 131.1) de limite de refoulement du film obtenues par K. FEIND (4) en fonction du diamètre du tube met en évidence la diminution de l'effet du courant gazeux, dans la zone des forts débits d'eau, sur cette limite lorsque le diamètre du tube diminue. Cette diminution de l'effet du courant gazeux sur la limite de refoulement pour les forts débits du liquide est également observée pour un accroissement de la longueur d'écoulement du film. Ces résultats sont liés à l'existence des vagues à la surface de film puisque d'après H. BRAUER (5) à un accroissement de la longueur d'écoulement du film correspond un accroissement de la hauteur du sommet de vague.

Cet accord qualitatif entre les résultats de ces auteurs et nos résultats expérimentaux peut être interprété à l'aide de

RESULTATS OBTENUS par K. FEIND



a : pour $D = 50$ mm ; b : pour $D = 20$ mm



a : pour $Z = 0,96$ m ; b : pour $Z = 2,52$ m

Figure I.131.1

l'analyse de la force exercée par un courant gazeux sur un film d'eau ridé faite par S. CALVERT et B. WILLIAMS (18). Rappelons que cette force est décomposée en deux termes :

- un terme de frottement, ne dépendant pas de l'aspect de la surface du film, fonction essentiellement de la vitesse du gaz.

- un terme de poussée dépendant de la vitesse du gaz et de l'aire de la section des vagues à la surface du film.

Aux faibles vitesses du gaz, le terme de frottement est négligeable, seul le terme de poussée peut prendre des valeurs non négligeables lorsque l'aire de la section des vagues à la surface du film atteint une valeur suffisante, donc lorsque le débit d'eau atteint une valeur donnée.

Ces considérations prennent une importance particulière dans cette étude en raison de la formation d'un bourrelet de liquide à la base du tube, où apparaît la formation de pistons de liquide.

I - 131 . 2 Domaine n° II : Ecoulement périodique de pistons de liquide et de bulles de gaz.

Au début d'une expérience, le tube est parfaitement mouillé et les conditions initiales sont : (ℓ_i, g_i) avec :

$$\begin{aligned}\ell_i &< 1 \text{ cm}^3/\text{s} \\ g_i &< 20 \text{ cm}^3/\text{s}\end{aligned}$$

Ces conditions sont représentées sur le diagramme n° I par le point i (ℓ_i, g_i) . Le liquide quitte le tube sous forme de gouttes. Si on augmente progressivement le débit d'eau, le débit de gaz restant constant (chemin 1), pour $\ell = 1 \text{ cm}^3/\text{s}$ il se forme un piston

de liquide qui bouche le tube à sa partie inférieure ; la pression du gaz dans le pot inférieur augmente et l'air refoule le piston de liquide dans le pot supérieur ; on a alors l'établissement de l'écoulement périodique de pistons de liquide et de bulles de gaz ; une période comprend les trois états suivants :

- état n° 1 : après refoulement du premier piston liquide formé et écoulement ascendant du gaz, la pression du gaz diminue, le liquide accumulé dans le pot supérieur se déverse alors dans le tube en entraînant des bulles d'air.

- état n° 2 : il se forme sur toute la hauteur du tube une colonne de pistons liquides emprisonnant des bulles d'air entourées d'un film de liquide. L'eau s'écoule à la base du tube dans le pot inférieur.

- état n° 3 : la pression du gaz introduit dans le pot inférieur fermé croît ; lorsqu'elle devient supérieure à la pression exercée par le poids de la colonne de pistons liquides, cette colonne est refoulée vers le sommet du tube et le gaz s'écoule dans le pot supérieur.

Il se produit ensuite une nouvelle formation de colonne de pistons liquides et le système se trouve à nouveau dans l'état 1.

La période de ce mode d'écoulement dépend des débits des deux fluides et du volume du pot inférieur fermé où est introduit l'air ; en effet, le taux d'accroissement de la pression du gaz dépend de ce volume.

Cette période dépend également de l'aire de la section du pot supérieur puisque la hauteur d'eau accumulée est un paramètre déterminant la nature de la colonne de pistons de liquide et de bulles d'air.

Comme nous le verrons, ce mode d'écoulement n'existe probablement jamais dans le cas du faisceau de tubes multiples, car la pression est statistiquement constante dans le pot inférieur et ne subit pas de variations périodiques.

I - 131 . 3 Domaine n° III : Accumulation de liquide dans le pot supérieur.

Lorsqu'on augmente le débit d'eau ℓ (chemin [1]) ou le débit de gaz g (chemin [2]), la période du mouvement des deux phases évolue ; pour des valeurs déterminées des débits ℓ et g le débit liquide de sortie devient inférieur au débit liquide d'entrée ; on a une accumulation de liquide dans le pot supérieur ; le système est alors dans un état non permanent.

I - 131 . 4 Domaine n° IV : "Bullage".

Ce mode d'écoulement existe pour les très faibles débits d'eau et pour les forts débits d'air.

Si, à partir d'un point du domaine I tel que ℓ soit inférieur à $0,5 \text{ cm}^3/\text{s}$, on augmente le débit d'air jusqu'à la valeur de $44 \text{ cm}^3/\text{s}$, il se forme à la base du tube pour cette valeur de g un ménisque de liquide qui bouche le tube. Alors que dans l'écoulement périodique de pistons liquides, le ménisque est alimenté et forme un piston stable de hauteur définie, dans le "bullage" le ménisque est détruit par le courant gazeux.

Si, à partir d'un point du domaine IV (tel que g soit inférieur à $75 \text{ cm}^3/\text{s}$), on augmente le débit ℓ (chemin [3]), pour une va-

leur déterminée de ℓ le système se place en état d'écoulement périodique de pistons.

Si, à partir d'un point du domaine IV (tel que g soit supérieur à $75 \text{ cm}^3/\text{s}$, on augmente le débit ℓ (chemin 4), pour une valeur déterminée de ℓ il y a accumulation de liquide dans le pot supérieur (domaine III).

I - 131 . 5 Domaine n° V : Ecoulement continu de filet de liquide lisse et de contre-courant de gaz dans la partie libre du tube.

Le diagramme n° I correspondait aux états obtenus réversiblement c'est-à-dire en faisant varier lentement les débits de gaz et de liquide.

Sur le diagramme n° II on a représenté en pointillés les limites des domaines "réversibles" du diagramme n° I ainsi que les limites d'un nouveau domaine n° V qui ne peut être obtenu que par variation brusque de certains débits et que nous qualifierons de métastable.

Le tube étant parfaitement mouillé, on place le système dans les conditions initiales définies au paragraphe I - 131 . 2 (point i). Si on augmente brusquement ℓ de la valeur initiale ($\ell_i < 1 \text{ cm}^3/\text{s}$) jusqu'à une valeur ℓ_j telle que $2 < \ell_j < 11,5 \text{ cm}^3/\text{s}$, le liquide s'écoule sous forme d'un gros filet lisse qui se superpose au film d'épaisseur minimale ; il quitte le tube non plus sous forme de gouttes mais sous forme de filet.

A partir du point (ℓ_j, g_i) ainsi obtenu, on décrit le do-

maine V qui se superpose aux domaines II et III. Soient (V)' la partie du domaine V superposée au domaine II et (V)" la partie superposée au domaine III.

Si, g restant constant, on augmente ou diminue progressivement le débit l à partir d'un point appartenant à (V)', (chemins [5] et [6]), le système se place à nouveau dans les conditions du domaine II pour des valeurs déterminées de l .

De même à partir d'un point de (V)" (chemins [7], [8] et [9]), le système se place dans les conditions du domaine III.

I - 131 . 6 Conclusion.

Nous n'avons jusqu'à présent étudié que les régimes permanents d'écoulement de gaz et de liquide à contre-courant. Il nous faut maintenant décrire deux autres séries d'essais, qui seront également nécessaires à l'interprétation du fonctionnement de la batterie de 126 tubes en parallèle.

L'une portera sur l'écoulement d'air dans un tube à parois parfaitement mouillées mais avec débit de liquide nul.

L'autre portera sur l'entraînement d'air par un fort écoulement d'eau, correspondant donc à un débit d'air négatif.

I - 132 Etude de l'écoulement d'air dans un tube parfaitement mouillé.

On place le système étudié précédemment dans les conditions

correspondant au domaine IV ("Bullage") ; ces conditions sont :

$$\begin{aligned} \ell &< 0,5 \text{ cm}^3/\text{s} \\ 44 &< g < 110 \text{ cm}^3/\text{s} \end{aligned}$$

On augmente g et on diminue ℓ de façon à décrire un chemin à l'intérieur du domaine IV. Lorsque le débit g atteint la valeur $g_{\ell=0} = 110 \text{ cm}^3/\text{s}$, le débit liquide de sortie s'annule, on coupe l'alimentation en liquide. Le système se trouve alors dans l'état permanent caractérisé par un film d'eau violemment agité communiquant avec une couche de liquide de déversement et maintenu en équilibre à la paroi intérieure du tube par un courant central de gaz g égal à $110 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Si on continue à augmenter g le système reste dans cet état, seul l'aspect de la surface du film liquide devient de moins en moins agité .

Lorsque g atteint la valeur $310 \text{ cm}^3/\text{s}$, le film liquide est refoulé vers le sommet du tube ; le tube se sèche.

L'existence de ces conditions est à rapprocher d'une part des observations faites par G.B. WALLIS (16) sur la transition entre les écoulements annulaire et par pistons à co-courant et, d'autre part, des résultats obtenus par E.Q. BASHFORTH et coll. (17) sur les conditions limites entre les écoulements annulaires à contre-courant et à co-courant. Ces auteurs ont été cités dans l'étude bibliographique.

Rappelons que G.B. WALLIS (16) rapporte le résultat suivant: dans le domaine de transition entre les écoulements par pistons et annulaire à co-courant, la surface de film est violemment agitée, la

partie lisse du film s'écoule vers le bas alors que les vagues à la surface se déplacent vers le haut. Ce résultat est également noté par ANDERSON et MANTZOURANIS (14) qui ont obtenu pour les contraintes à la paroi des valeurs négatives malgré un écoulement positif du liquide, ce qui montre qu'à la paroi le liquide s'écoule vers le bas et qu'à la surface, il s'écoule vers le haut. Ces résultats montrent que, dans un domaine déterminé, l'écoulement du film liquide résulte de la combinaison de deux processus.

E.Q. BASHFORTH et coll. (17) étudient les conditions pour lesquelles la combinaison de ces deux processus conduit à un écoulement global du liquide nul. Le système étudié par ces auteurs comprend un tube de 25,4 mm de diamètre et de 183 cm de longueur, où est introduit une quantité de liquide à l'état de film en présence d'un courant de gaz. Les limites de ce domaine dépendent des natures du liquide et du gaz, et des dimensions du tube ; elles dépendent également de tout facteur intervenant sur l'un des processus d'écoulement du liquide, en particulier de la configuration de la surface de film dont dépend la force exercée par le gaz sur le liquide.

L'influence de ce paramètre permet d'expliquer qualitativement les écarts entre les limites de ce domaine obtenues par BASHFORTH et coll. (17), qui sont :

$$9,45 < u_G < 12,5 \text{ m/s}$$

et celles obtenues dans ce présent travail, qui sont :

$$3,30 < u_G < 8,7 \text{ m/s.}$$

En effet, l'état du système étudié par BASHFORTH et coll. (17) est très différent de celui étudié dans le présent travail. Ces auteurs considèrent un film de faible épaisseur par rapport au dia-

mètre du tube, le liquide étant introduit par une fente annulaire et le courant gazeux s'écoulant sur une certaine longueur de tube sec avant de rencontrer le liquide ; dans notre cas, le liquide occupe sur toute la hauteur du tube une fraction importante de la section de ce tube, sa configuration évolue d'un état de film ridé pour la partie supérieure du domaine à un état voisin de celui qui existe dans le domaine de transition entre les écoulements par pistons et annulaire à co-courant pour la partie inférieure.

I - 133 Etude de l'entraînement d'air par un écoulement d'eau dans un tube.

Bien qu'étant un mode d'écoulement à deux phases, à co-courant, l'étude de l'entraînement d'air par un écoulement d'eau a sa place dans ce chapitre puisqu'elle représente un des états où peut se trouver l'un des tubes du faisceau lors d'une expérience à contre-courant gaz-liquide.

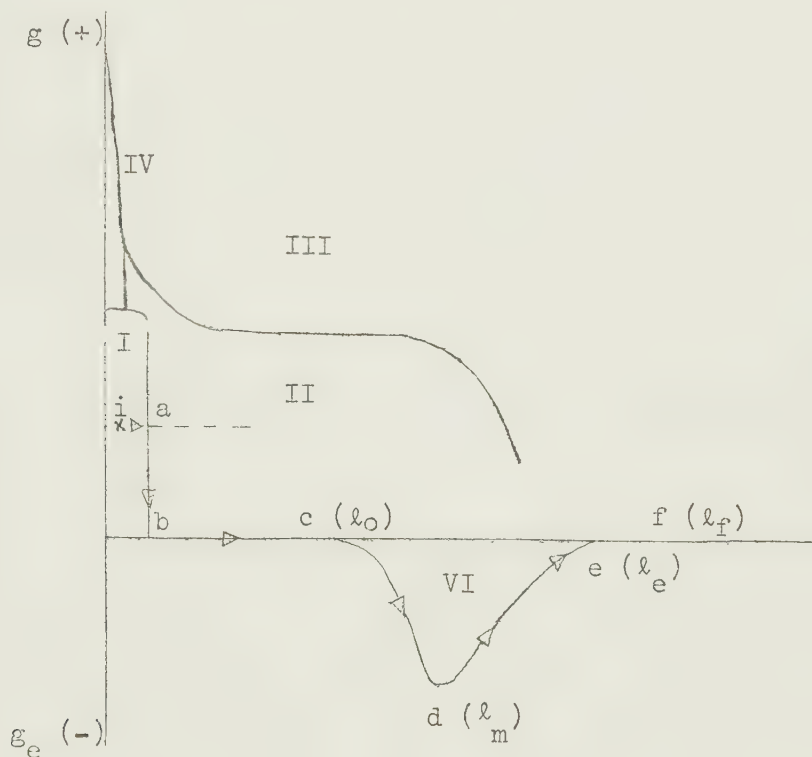
Cette étude comprendra :

- la mesure du débit d'air entraîné.
- le calcul de la fraction de volume β_L du tube occupé par le liquide.
- le calcul de la charge correspondant à la colonne formée de pistons de liquide et de bulles d'air.

I - 1333 . 1 Mesure du débit d'air entraîné g_e .

Au dispositif expérimental décrit au paragraphe I - 122 est ajouté un circuit branché sur le pot inférieur ; ce circuit comprend un rotamètre et un robinet à pointeau ; le rotamètre permet de

mesurer le débit total d'air introduit et d'air entraîné, le robinet permet de régler la pression imposée dans le pot inférieur.



Sur le schéma ci-dessus sont représentés le diagramme n° I et l'une des courbes donnant les variations du débit d'air entraîné g_e en fonction de l ; l'ensemble de ces courbes définit le domaine VI qui correspond à l'état de fonctionnement du tube lorsqu'existe dans le pot inférieur une pression constante imposée.

Le système est placé dans des conditions initiales telles qu'on ait un écoulement continu d'un film ridé et d'un contre-courant central de gaz (point i). On augmente progressivement l en maintenant g constant ($\overrightarrow{ia}$) ; pour l égal à $1 \text{ cm}^3/\text{s}$, il se forme à la base du tube un piston liquide qui bouche le tube (cf. paragraphe I.131.2), le débit d'air introduit sort par le circuit de sortie ajouté au dispositif, le débit d'air g dans le tube est donc nul ($\overrightarrow{ab}$). On

maintient la pression imposée dans le pot inférieur à une valeur constante en réglant la chute de pression subie par l'air dans le circuit de sortie.

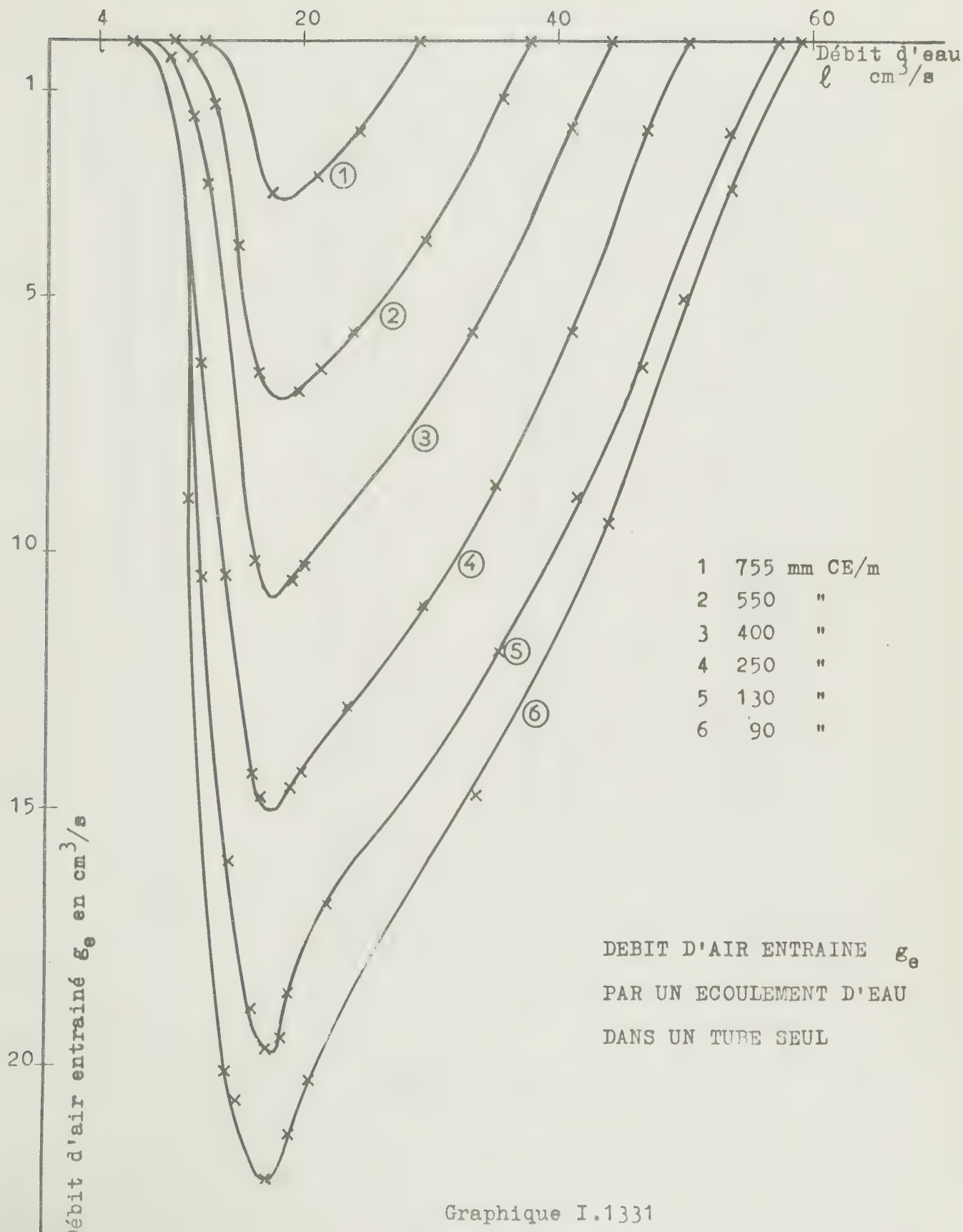
On étudie alors le débit d'air entraîné g_e en fonction du débit d'eau l pour différentes valeurs de l'augmentation de pression imposée qui est subie par l'air entraîné (domaine VI) ; les résultats obtenus sont portés sur le graphique I.1331. On observe l'existence d'un maximum très accusé.

L'observation du mode d'entraînement de l'air conduit à distinguer les quatre états suivants, représentés schématiquement sur la figure I.1331 :

- Etat n° 1 : pour les valeurs de l comprises entre $1 \text{ cm}^3/\text{s}$ et l_0 ($\overrightarrow{bc}$), valeur de l où apparaît l'entraînement de la première bulle d'air, le liquide se trouve sous forme de film ridé dans la partie supérieure du tube et sous forme de piston dans la partie inférieure. Pour chaque valeur de la surpression imposée dans le pot inférieur, il y a une hauteur de piston correspondant à l'équilibre. Le débit d'air entraîné g_e est nul.

- Etat n° 2 : pour l compris entre l_0 et l_m ($\overrightarrow{cd}$), valeur de l correspondant à g_e maximal, le tube se bouche par formation d'un piston liquide à la partie supérieure du tube, une bulle d'air est entraînée. Dans ce domaine, cet entraînement de bulles d'air est aléatoire ; le liquide a un mouvement périodique irrégulier.

- Etat n° 3 : pour l compris entre l_m et l_e ($\overrightarrow{de}$), valeur de l pour laquelle l'air cesse d'être entraîné sous forme de grosses bulles, l'entraînement d'air est périodique ; les deux phases s'écoulent à co-courant avec un mouvement périodique régulier.



Graphique I.1331

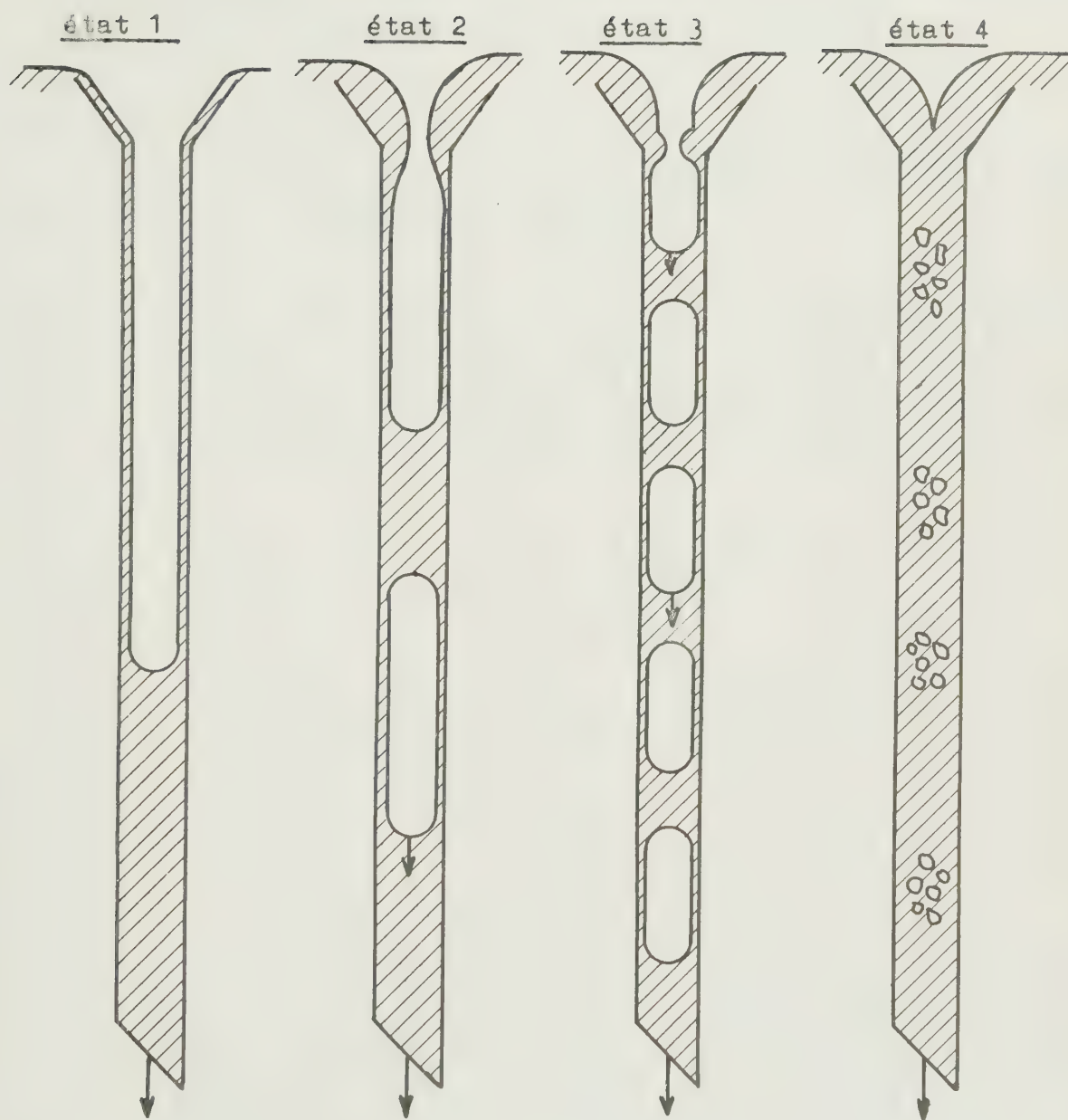


Figure I.1331

- Etat n° 4 : pour ℓ supérieur à ℓ_e ($\overrightarrow{ef}$), l'air est entraîné sous forme de chapelet de petites bulles ; le liquide tend à occuper tout le volume du tube, le débit g_e tend vers zéro.

I - 133 . 2 Calcul de la fraction de volume β_L du tube occupée par le liquide.

Lorsqu'on isole, dans le tube expérimental, une colonne formée de pistons liquides séparés par des bulles d'air en bouchant l'extrémité supérieure du tube, on constate que la vitesse de glissement de l'air sur l'eau est nulle. On peut donc écrire :

$$u_L = u_G$$

d'où

$$u_L = u_G = \frac{\ell + g_e}{\Omega} \quad (1)$$

Appelons β_L le taux de rétention liquide ; on a :

$$\beta_L = \frac{\ell}{\ell + g_e} \quad (2)$$

Cette formule nous permet d'obtenir la variation du taux de rétention liquide β_L en fonction du débit liquide ℓ à partir des mesures du débit d'air entraîné g_e en fonction de ℓ pour différentes valeurs de la surpression imposée à l'air entraîné. Elle n'est valable que pour un écoulement périodique régulier des deux phases, donc pour ℓ supérieur ou égal à ℓ_m (états n° 3 et n° 4).

Pour ℓ inférieur à ℓ_0 (état n° 1) la valeur de β_L est ob-

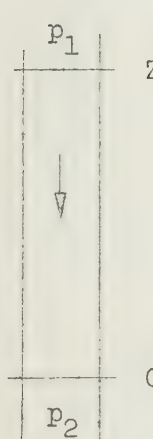
tenue directement à partir de la hauteur de piston équilibrant la surpression imposée.

Pour ℓ compris entre ℓ_0 et ℓ_m , la rétention moyenne de liquide sera extrapolée à partir des résultats obtenus pour les états n° 1, 3 et 4.

Les résultats obtenus sont portés sur le graphique n° I.133.2.

I - 133 . 3 Calcul de la charge correspondant à la colonne formée de pistons de liquide et de bulles d'air.

On écrit le bilan des forces appliquées à la colonne formée de pistons de liquide et de bulles de gaz :



$$\Delta P_{\text{frottement}} = \left\{ p_1 + g_a Z \left[\rho_L \beta_L + \rho_G (1 - \beta_L) \right] \right\} - \left\{ p_2 + (\rho_L + \rho_G) \frac{u_L^2}{2} \right\}$$

Or $\Delta P_{\text{imposée}} = p_2 - p_1$

d'où

$$\Delta P_{\text{frottement}} = g_a Z \left[\rho_L \beta_L + \rho_G (1 - \beta_L) \right] - (\rho_L + \rho_G) \frac{u_L^2}{2} - \Delta P_{\text{imposée}} \quad (3)$$

Négligeons $\rho_G \ll \rho_L$ et exprimons cette relation en charge d'eau :

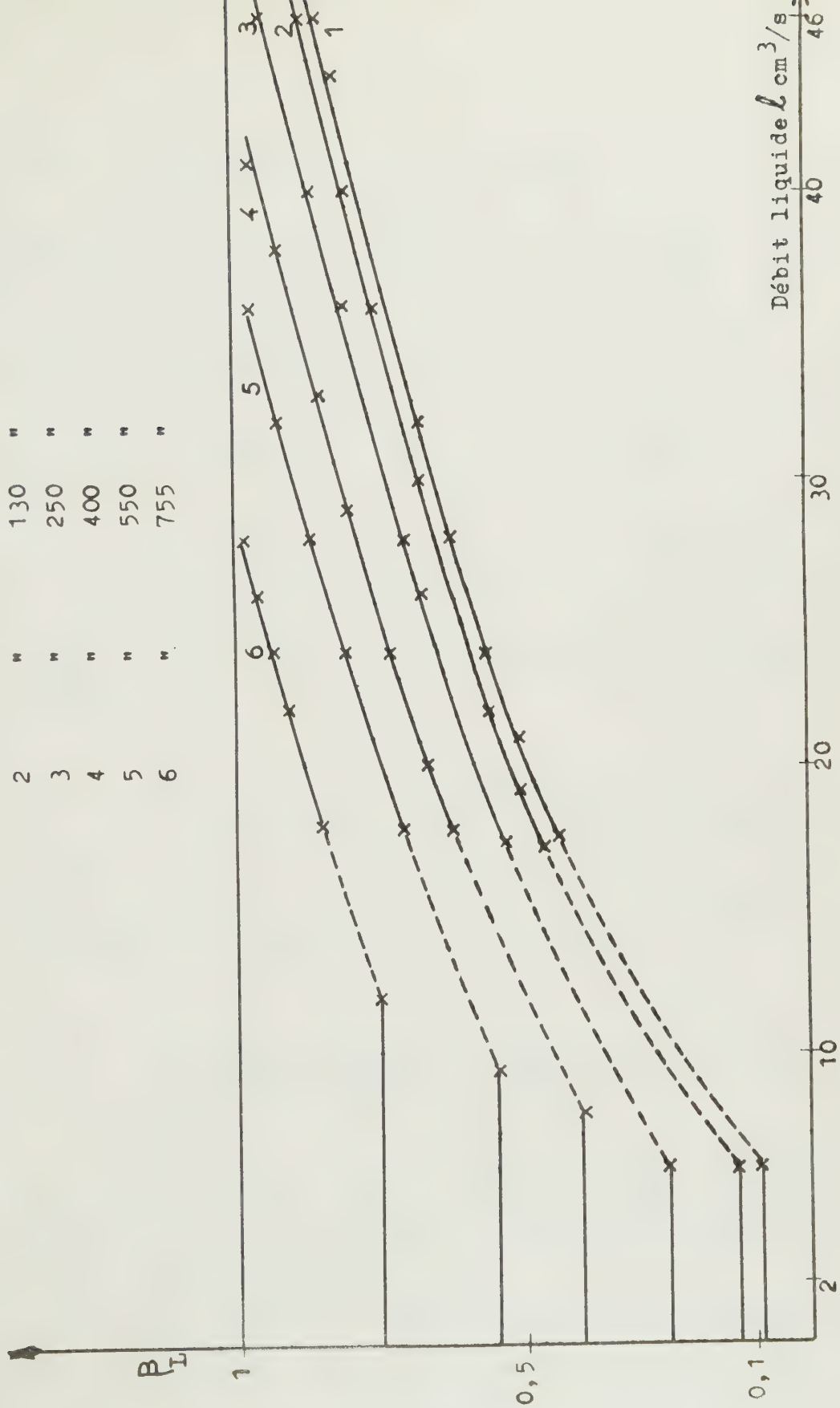
$$\Delta H_{\text{frottement}} = Z \beta_L - \frac{u_L^2}{2 g_a} - \Delta H_{\text{imposée}} \quad (4)$$

ou

$$Z \beta_L = \Delta H_{\text{imposée}} + \Delta H_{\text{frottement}} + \frac{u_L^2}{2 g_a}$$

TAUX DE RETENTION LIQUIDE β_L DANS UN TUBE SEUL

1	P imposée = 90 mm CE/m
2	" 130 "
3	" 250 "
4	" 400 "
5	" 550 "
6	" 755 "



Pour $\ell \geq \ell_m$ (états n° 3 et 4), il vient :

$$Z \frac{\ell}{\ell + g_e} = \Delta H_{\text{imposée}} + \Delta H_{\text{frottement}} + \frac{(\ell + g_e)^2}{2 g_a \Omega^2} \quad (5)$$

Pour $\ell < \ell_0$ (état n° 1), on a :

$$Z \beta_L = \Delta H_{\text{imposée}} + \Delta H_{\text{frottement}} + \frac{\ell^2}{2 g_a \Omega^2} \quad (6)$$

Le calcul des deux derniers termes du deuxième membre de l'équation (6), effectué pour les valeurs ℓ_0 obtenues pour chaque valeur de la surpression imposée, montre qu'ils sont négligeables devant la surpression $\Delta H_{\text{imposée}}$; ils tendent vers zéro lorsque ℓ tend vers zéro.

Ce calcul montre que la charge représentée par la colonne de pistons et de bulles de gaz reste toujours supérieure à la surpression imposée et que, par conséquent, en l'absence de fluctuations de cette surpression dans le pot inférieur, le tube bouché à sa base par un piston de liquide ne pourra se déboucher.

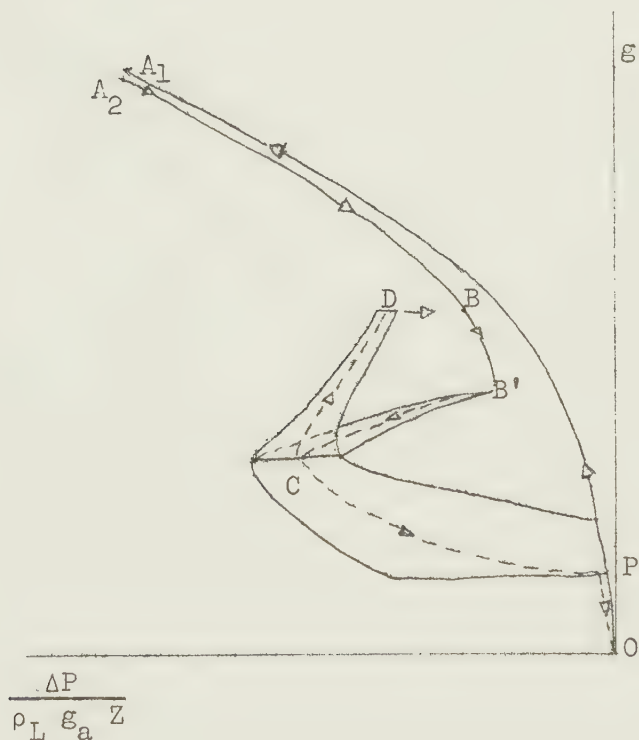
I - 134 Etude des chutes de pression subies par l'air dans les différents états pris par le système.

La mesure de la chute de pression de l'air est effectuée dans tous les cas où existe un écoulement ascendant continu de l'air à l'intérieur du tube expérimental ; on étudie les six cas suivants :

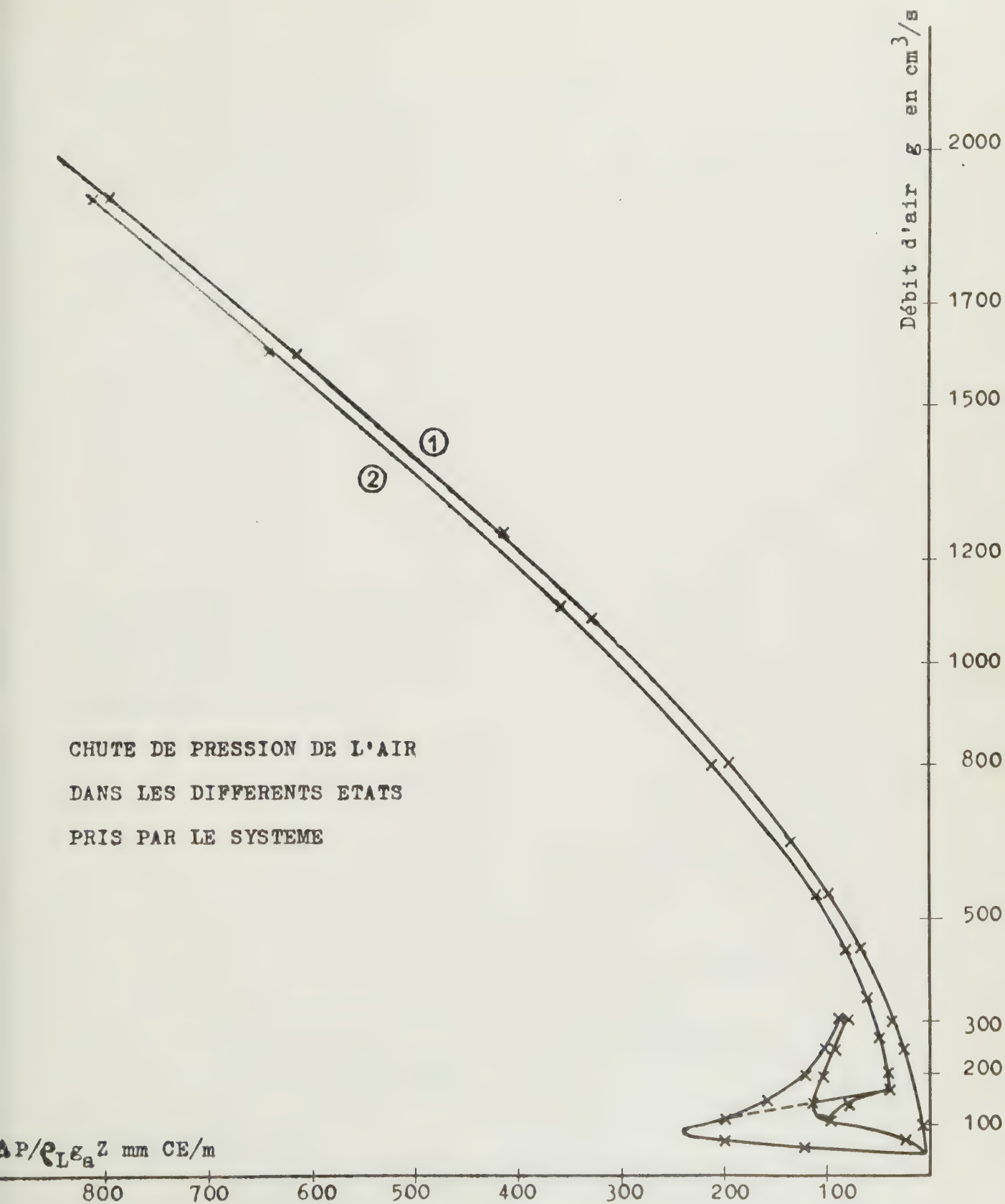
- dans un tube sec.
- dans un tube sec avec une couche d'eau au-dessus du sommet du tube.

- dans un tube partiellement mouillé.
- dans un tube parfaitement mouillé.
- dans le domaine IV ("Bullage").
- dans un tube où on a écoulement d'un film ridé et d'un contre-courant central d'air.

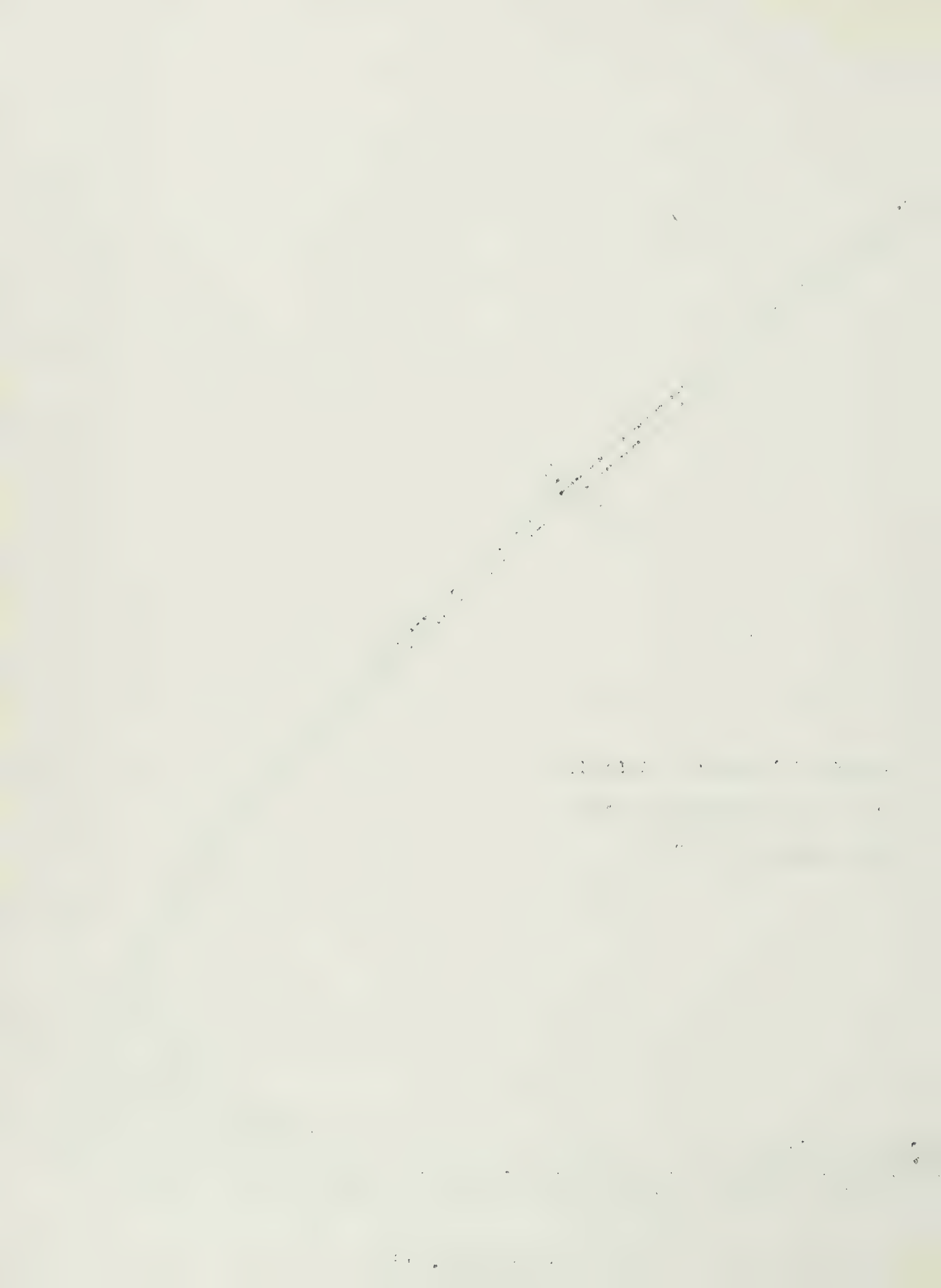
L'ensemble des résultats est porté sur un graphique général des chutes de pression n° I.134 et schématisé sur la figure ci-dessous.

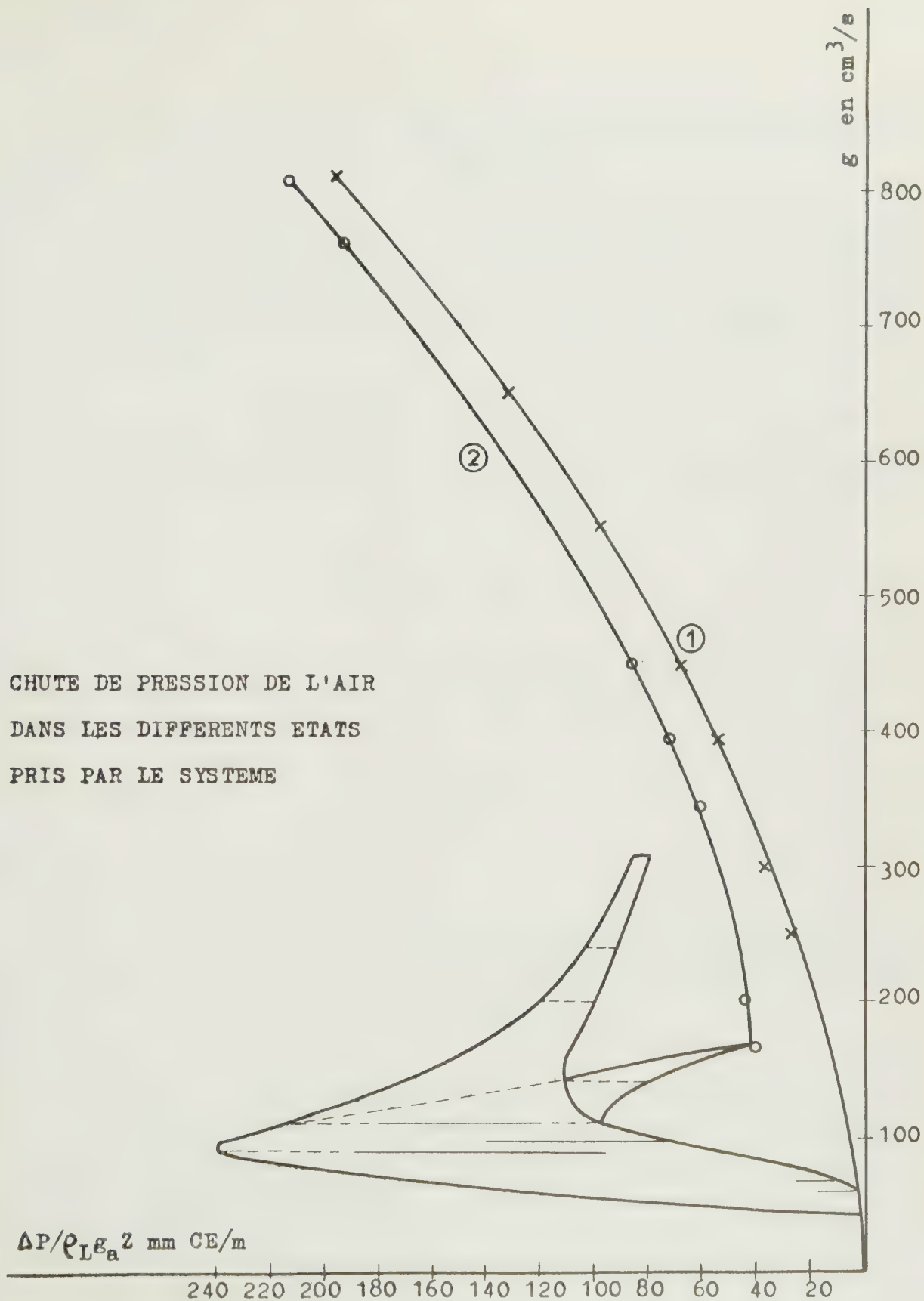


Les différentes expériences, faites au cours de cette étude des chutes de pression de l'air peuvent être représentées sur ce schéma par des chemins fléchés.



Graphique I.134





Graphique I.134 bis

I - 134 . 1 Chute de pression de l'air dans un tube sec
 (chemin $\xrightarrow{\quad} O P A_1$)

La chute de pression de l'air dans un tube sec est étudiée pour des débits d'air variant de 0 à 1900 cm³/s. Les résultats obtenus correspondent à la courbe n° 1 du graphique général (chemin $O P A_1$).

Dans le domaine des valeurs de g supérieures à 80 cm³/s, c'est-à-dire pour un nombre de Reynolds supérieur à 1200, nos résultats expérimentaux sont représentés par la formule de BLASTUS :

$$\frac{\Delta P}{Z} = 0,32 \frac{u_G^2}{2 g_a d} Re_G^{-\frac{1}{4}}$$

Dans le domaine des valeurs de g inférieures à 80 cm³/s, nos résultats expérimentaux sont représentés par la formule de POISEUILLE :

$$\frac{\Delta P}{Z} = \frac{128 \eta_G g}{\pi d^4}$$

I - 134 . 2 Chute de pression de l'air dans un tube sec
 avec une couche d'eau au-dessus du sommet du
 tube (chemin $\xrightarrow{\quad} A_2 B$)

On étudie la chute de pression subie par l'air dans un tube sec avec une couche de liquide ayant une épaisseur Z_C d'environ un centimètre maintenue en équilibre au-dessus du niveau du sommet du tube par le courant d'air circulant à l'intérieur du tube.

Au débit d'air maximal atteint précédemment on introduit

l'eau dans le pot supérieur jusqu'à ce que le niveau de l'eau dans ce pot dépasse le niveau du sommet du tube d'environ 1 cm (chemin $\overrightarrow{A_1 A_2}$) ; à partir de ce débit on diminue g et on obtient les résultats représentés par le chemin $\overrightarrow{A_2 B}$.

Dans tout le domaine de débits g compris entre 1900 et 300 cm³/s, le système reste en équilibre ; la chute de pression est représentée par la relation :

$$\Delta P_C = \Delta P_S + \rho_L g_a Z_C$$

ΔP_C est la chute de pression avec couche d'eau

ΔP_S est la chute de pression dans le tube sec

Z_C est la hauteur de la couche d'eau.

On remarque que cette relation n'est plus rigoureusement vérifiée au voisinage de la limite inférieure de ce domaine ; pour les valeurs de g comprises entre 400 cm³/s et 300 cm³/s, le liquide commence à pénétrer dans l'entonnoir formant l'extrémité supérieure du tube (point B).

I - 134 . 3 Chute de pression de l'air dans un tube partiellement mouillé (chemin $\overrightarrow{B B' C}$).

A partir des conditions correspondant à la limite inférieure du domaine précédent, on continue à faire décroître g ; le liquide pénètre dans le tube sous forme de filets sur une longueur dépendant du débit d'air. Pour g égal à 110 cm³/s le liquide se trouve sous forme de film violemment perturbé sur toute la hauteur du tube, état correspondant aux conditions de la limite supérieure du domaine n° IV ("Bullage").

Ainsi lorsque le débit d'air passe de la valeur $310 \text{ cm}^3/\text{s}$ à la valeur $110 \text{ cm}^3/\text{s}$ l'état du liquide évolue de l'état de filets à l'état de film violemment agité.

Les variations de la chute de pression dans ce domaine sont représentées par la courbe $B B' C$.

On fera, sur la partie de ce domaine correspondant à g inférieur à $160 \text{ cm}^3/\text{s}$ ($\overrightarrow{B'C}$), les deux remarques suivantes :

- à partir de cette valeur du débit d'air, la chute de pression subit d'importantes fluctuations, dues à l'agitation du liquide; on porte sur le graphique général les segments représentant l'amplitude de ces fluctuations ; on obtient non plus une courbe mais un domaine où se situe la valeur instantanée de la chute de pression.

- pour g compris entre 160 et $110 \text{ cm}^3/\text{s}$ ($\overrightarrow{B'C}$), la chute de pression augmente lorsque le débit d'air diminue ; l'évolution de l'état du liquide en fonction du débit d'air contrôle la chute de pression subie par l'air.

I - 134 . 4 Chute de pression de l'air dans un tube parfaitement mouillé (chemin $\overleftrightarrow{CD}$).

L'état du système où se produit l'écoulement d'air dans un tube parfaitement mouillé peut être atteint de deux façons différentes :

- à partir des conditions appartenant au domaine n° IV (cf. paragraphe I.131.4).

- à partir des conditions où on a un tube partiellement mouillé (cf. paragraphe I.134.3).

Sur les résultats obtenus dans cet état du système, on fait les observations suivantes :

1) la chute de pression de l'air subit des fluctuations dont l'amplitude diminue, lorsque le débit d'air augmente ; comme précédemment on ne définit plus une courbe donnant ΔP vs g mais un domaine où se situe les valeurs instantanées de la chute de pression.

2) la chute de pression de l'air diminue lorsque le débit d'air augmente ; cette variation de ΔP est due à l'évolution de la configuration de la surface de film liquide en fonction du débit d'air.

Comme nous l'avons dit au paragraphe I.132, l'état du liquide évolue entre les deux états suivants :

- pour $g = 110 \text{ cm}^3/\text{s}$, à la surface de film il existe des vagues qui occupent une grande partie de la section du tube.

- pour $g = 310 \text{ cm}^3/\text{s}$, à la surface de film il existe des microrides de très faible amplitude.

A l'aide de ces observations, on peut interpréter qualitativement la décroissance de la chute de pression de l'air en reprenant l'expression proposée par S. CALVERT et B. WILLIAMS (18) (cf. paragraphe I.113) :

$$\Delta P_W = \Delta P_E + \Delta P_D$$

Le terme ΔP_D chute de pression due au frottement augmente lorsque la vitesse de l'air augmente.

Le terme ΔP_E chute de pression due à la poussée de l'air sur les vagues diminue lorsque l'air de la section de la vague di-

minue, donc lorsque le débit d'air augmente.

Les résultats obtenus montrent que, dans le domaine considéré, le terme ΔP_E contrôle la variation de la chute de pression de l'air.

3) comme nous l'avons rapporté au paragraphe I.132, lorsque g atteint la valeur de $310 \text{ cm}^3/\text{s}$, le film ridé est refoulé et le tube se sèche ; le système évolue jusqu'à ce qu'on ait une couche de liquide au-dessus du sommet du tube sec ; la chute de pression prend la valeur correspondant à cet état du système (cf. paragraphe I.134.2): le système passe du point D au point B.

I - 134 . 5 Chute de pression de l'air dans le domaine IV
("Bullage") (chemin $\overleftrightarrow{P C}$)

De même que pour un tube parfaitement mouillé, la chute de pression de l'air subit d'importantes fluctuations, dues à la formation et la rupture des ménisques de liquide.

Pour chaque couple (λ , g) la chute de pression sera encore représentée par un segment dont la longueur est égale à l'amplitude des oscillations de la chute de pression.

On souligne les deux résultats suivants :

- Plus le débit d'eau est grand, plus l'amplitude des oscillations est grande.

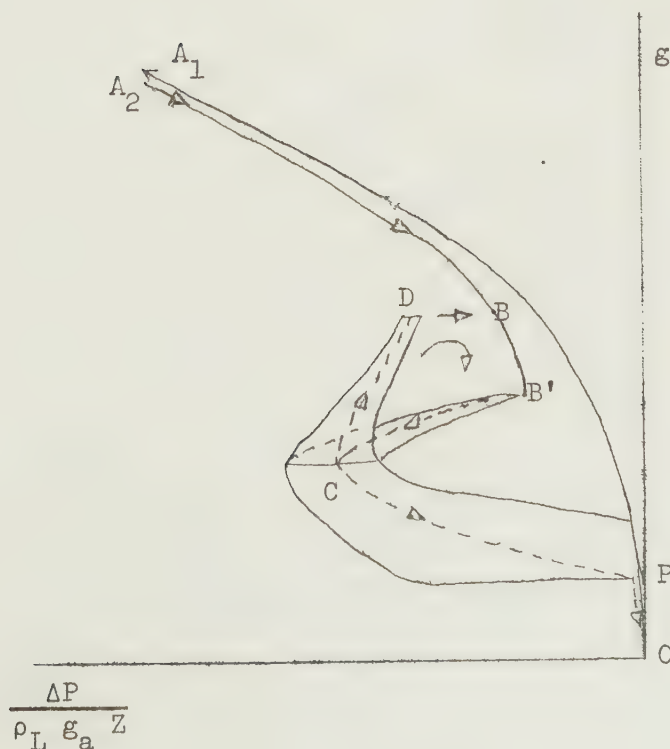
- La valeur maximale de la chute de pression observée dans ce domaine est $220 \text{ mm CE} \pm 10 \%$.

I - 134 . 6 Chute de pression de l'air dans le domaine
d'écoulement continu d'un film ridé et d'un
contre-courant central de gaz (chemin $\overleftrightarrow{OP}$).

Le dispositif expérimental ne nous a pas permis d'obtenir une précision qui nous aurait donné la possibilité d'observer dans ce domaine le faible effet du film liquide sur l'écoulement du gaz ; l'étude de cet effet ne présentant pas d'intérêt dans ce travail. Les résultats obtenus dans ce domaine sont représentés avec une approximation suffisante par la formule de POISEUILLE :

$$\frac{\Delta P}{Z} = \frac{128 \eta_G g}{\pi d^4}$$

I - 134 . 7 Résumé.



On note que le chemin $\overline{O P}$ représente à la fois l'écoulement de gaz dans un tube sec et dans un tube où s'écoule un film d'eau ridé (cf. paragraphe I.134.6).

Le chemin $O P A_1 A_2 B B' C D B$ tracé sur le schéma ci-dessus correspond à l'évolution suivante du système :

- en O le système se réduit à un tube sec.
- sur $\overline{O P A_1}$ on augmente le débit d'air.
- sur $A_1 A_2$ on introduit une couche de liquide au-dessus du sommet du tube.
- sur $A_2 B$ on diminue le débit d'air ; le système comprend un tube sec et une couche d'eau au-dessus du sommet du tube.
- en B le liquide commence à pénétrer dans l'entonnoir formant l'extrémité supérieure du tube.
- sur $B B' C$ on diminue le débit d'air ; le système comprend un tube partiellement mouillé et une couche de liquide au-dessus du sommet du tube.
- en C le tube est parfaitement mouillé.
- sur $C D$ on augmente le débit d'air ; le système comprend un tube parfaitement mouillé et une couche de liquide au-dessus du sommet du tube.
- en D le tube se sèche ; le système revient à l'état où il se trouvait en B : le chemin $D B$ est irréversible ; le cycle $B B' C D B$ peut être ainsi parcouru indéfiniment. Dans tous les autres cas le système est réversible et le cycle peut être quitté de deux façons :
 - à partir de B l'augmentation du débit d'air fait parcourir le chemin $B A_2$;
 - à partir de C la diminution du débit d'air fait parcourir le chemin $C P$; le système se trouve dans l'état correspondant au domaine du "Bullage".

- en P il y a passage de l'écoulement sous forme de "bulla-ge" à l'écoulement central d'air à contre-courant d'un film d'eau ridé.
- sur P O on diminue le débit d'air ; le système reste dans l'état apparu en P.
- Enfin le chemin O P C peut être parcouru à débits d'air croissants.

I - 14 CONCLUSION. PRESENTATION D'UN DIAGRAMME GENERAL.

Le but que nous nous sommes fixés dans la première partie de ce travail fut d'étudier tous les états où pourrait se trouver un tube lors des expériences sur l'écoulement gaz-liquide à contre-courant dans un faisceau de tubes montés en parallèle.

Ceci nous a conduit à étudier :

- tous les modes possibles d'écoulement gaz-liquide à contre-courant dans un tube de 6,5 mm de diamètre.
- l'entraînement d'air par un écoulement d'eau pour différentes surpressions imposées à l'air.
- l'écoulement ascendant d'air dans un tube parfaitement mouillé, à débit d'eau nul.
- la chute de pression de l'air dans tous les cas d'écoulement ascendant continu.

Le dispositif expérimental monté pour cette étude ne réalise qu'une approche des conditions de fonctionnement d'un tube du faisceau, en particulier il ne permet pas d'observer quelle est l'influence sur le fonctionnement d'un tube de la présence d'un second

tube ou de plusieurs tubes montés en parallèle. En conséquence, tous les résultats obtenus dans cette première partie ne sont pas à retenir pour l'interprétation du fonctionnement d'un faisceau de tubes. Tel est notamment le cas du domaine II (Ecoulement périodique de pistons de liquide et de bulles de gaz à contre-courant) et du domaine III (Accumulation d'eau dans le pot supérieur).

L'ensemble des résultats obtenus dans cette première partie, utiles pour l'interprétation du fonctionnement d'un faisceau de tubes, est rassemblé sur un diagramme général (graphique I.14) en doubles coordonnées logarithmiques qui comprend quatre quadrants :

- sur le quadrant I est reporté le diagramme des modes d'écoulement.
- sur le quadrant II sont reportés tous les résultats concernant la chute de pression de l'air.
- sur le quadrant III sont reportés les résultats concernant le débit d'air entraîné g_e en fonction de la surpression imposée pour différents débits d'eau l .
- sur le quadrant IV sont reportés les résultats concernant le débit d'air entraîné g_e en fonction du débit d'eau l pour différentes surpressions imposées à l'air.

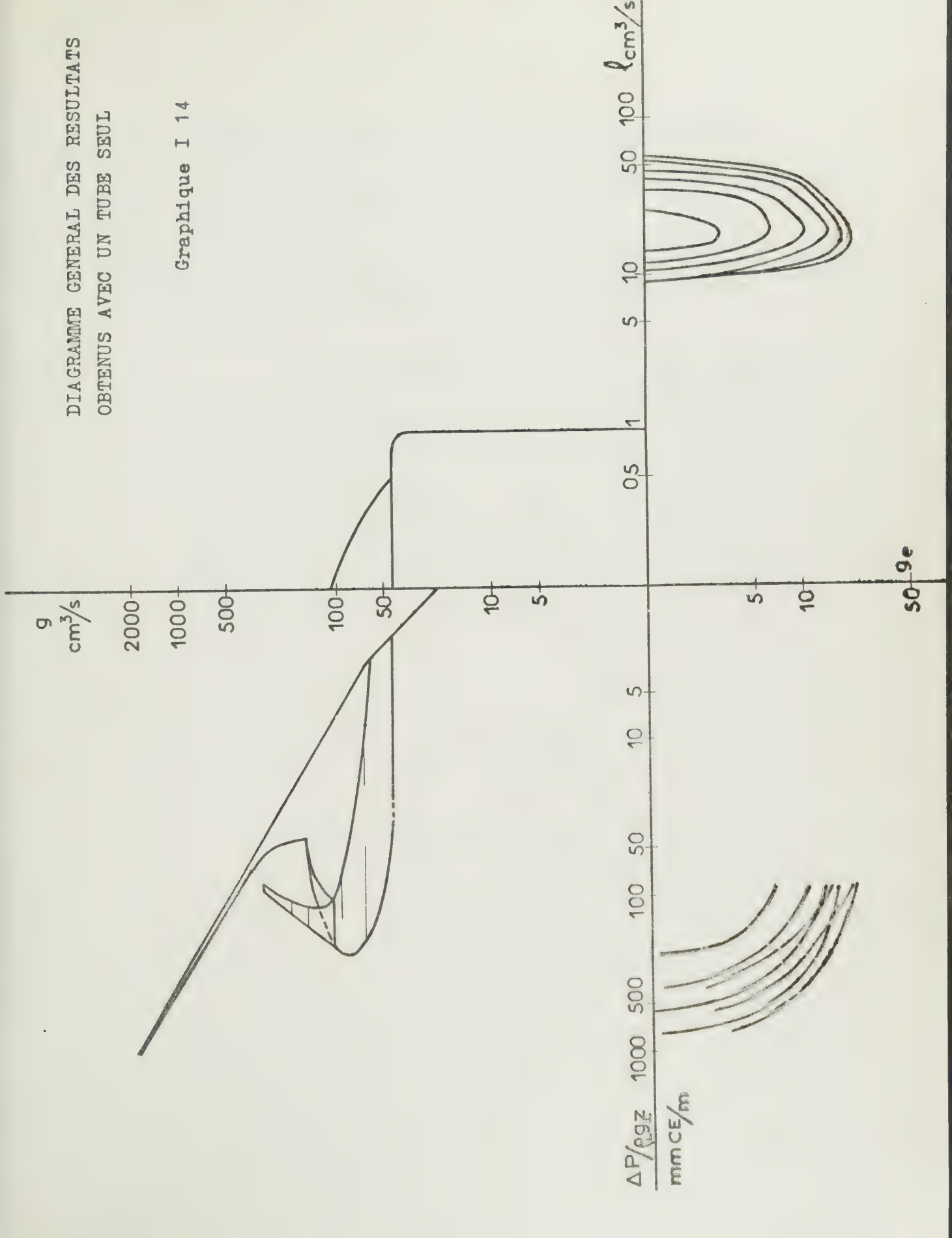
C'est essentiellement sous cette forme que seront utilisés les résultats obtenus dans cette première partie pour l'interprétation des propriétés de l'écoulement gaz-liquide à contre-courant dans un faisceau de tubes.

On constate que pour une chute de pression ΔP imposée, divers modes de fonctionnement peuvent exister :

- "Tube-liquide", tube en état d'écoulement par pistons à

DIAGRAMME GENERAL DES RESULTATS
OBTENUS AVEC UN TUBE SEUL

Graphique I 14



co-courant descendant air entraîné - eau (domaine VI).

- "Tube-gaz", tube en état d'écoulement continu ascendant de gaz (domaines I et IV).

Le passage de l'état "tube-liquide" à l'état "tube-gaz" sera appelé "débouchage" du tube liquide.

Les expériences effectuées sur un tube ne nous ont pas permis de déterminer les conditions pour lesquelles se produit le débouchage d'un tube-liquide ; elles nous ont montré qu'en l'absence de fluctuations de la surpression imposée à la base du tube il ne peut y avoir débouchage d'un tube liquide ; le calcul effectué au paragraphe I.133.3 confirme ce résultat. En conséquence, il fut décidé de faire l'étude de l'écoulement gaz-liquide à contre-courant dans deux tubes montés en parallèle.

-:-:-

C h a p i t r e I - 2

-:-:-

ETUDE DE L'ÉCOULEMENT GAZ-LIQUIDE A CONTRE-COURANT DANS UN SYSTÈME DE DEUX TUBES MONTÉS EN PARALLÈLE.

-:-:-:-

I - 21 INTRODUCTION.

L'intérêt de l'étude des propriétés de l'écoulement gaz-liquide à contre-courant dans un système de deux tubes montés en parallèle est de compléter les résultats obtenus avec un tube unique et de les appliquer à un système simple, donc de les vérifier.

Pour chaque expérience, le système initial comprend :

- un tube-liquide où s'écoule un débit d'eau L égal à $18 \text{ cm}^3/\text{s}$.
- un tube-gaz où s'écoule un débit d'air G compris entre 0 et $1900 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Dans chaque cas on diminue progressivement le débit de liquide à débit de gaz constant et on étudie l'évolution du système et le débouchage du tube-liquide.

On utilise le dispositif expérimental réalisé pour l'étude de l'écoulement gaz-liquide à contre-courant dans un tube unique ; un second tube identique au premier est monté sur ce dispositif ; les sommets des deux tubes sont placés dans un même plan horizontal, l'uniformité de la répartition des débits de liquide sur chacun des deux tubes est ainsi approchée de la même façon que dans le montage du faisceau de tubes.

I - 22 RESULTATS RELATIFS A L'EVOLUTION DU SYSTEME DE DEUX TUBES.

Comme nous l'avons vu, un tube-gaz peut se trouver dans cinq états différents qui sont :

- I - tube-gaz sec pour g supérieur ou égal à $310 \text{ cm}^3/\text{s}$.
- II - tube-gaz partiellement mouillé pour g compris entre 310 et $110 \text{ cm}^3/\text{s}$.
- III - tube-gaz mouillé pour g compris entre 310 et $110 \text{ cm}^3/\text{s}$.
- IV - tube-gaz à l'état de "bullage" pour g compris entre 110 et $44 \text{ cm}^3/\text{s}$.
- V - tube-gaz où l'air s'écoule à contre-courant d'un film d'eau ridé pour g inférieur à $44 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Dans un système de deux tubes, les états I, II et III, pour lesquels le débit d'eau est nul, sont les seuls états où peut se trouver un tube-gaz en parallèle d'un seul tube-liquide ; en conséquence, on étudie l'évolution du système de deux tubes à débit d'eau L décroissant et à débit d'air G constant à partir des trois états initiaux correspondant aux états I, II et III du tube-gaz. On étudie également le caractère de réversibilité de l'évolution du système en réaugmentant le débit d'eau à partir du débit d'eau final. Au cours des expériences, on mesure la chute de pression de l'air.

Les expériences montrent qu'il existe six états finaux, où peut se placer le système, qui sont :

- 1 - Deux tube-gaz secs surmontés d'une couche d'eau.
- 2 - Un tube-gaz sec et un tube-gaz mouillé surmontés d'une couche d'eau.
- 3 - Un tube-gaz sec et un tube à l'état de "bullage".
- 4 - Un tube-gaz partiellement mouillé et un tube à l'état de "bullage".
- 5 - Un tube-gaz mouillé et un tube à l'état de "bullage".
- 6 - Deux tubes à l'état de "bullage".

Une transformation (I.1) représentera l'évolution du système entre l'état initial I et l'état final 1.

Le tableau n° I.22 récapitule les diverses transformations possibles, avec les valeurs des débits de gaz correspondants :

- En abscisses sont représentés les trois états initiaux.
- En ordonnées les six états finaux.

Dans chaque case sont portées les valeurs du débit de gaz (qui reste constant dans toute une expérience) et des chutes de pression initiales et finales. On mentionne également le caractère réversible ou irréversible de la transformation.

I - 221 Evolution du système de deux tubes à partir de l'état initial I : "tube-liquide et tube-gaz sec".

L'expérience montre qu'on peut avoir les quatre transformations suivantes :

- a) Transformation (I.1) pour $G \geq 760 \text{ cm}^3/\text{s}$
- b) Transformation (I.2) pour $700 \leq G < 760 \text{ cm}^3/\text{s}$

Tableau n° I.22.

ETAT INITIAL :		Etat n°	I	II	III
ETAT FINAL :	un tube-liquide avec $L_{\text{initial}} = 18 \text{ cm}^3/\text{s}$ et un tube-gaz				
$0 < L_{\text{final}} < 1$ G_{initial} G_{final}			tube-gaz sec	tube-gaz partiellement mouillé	tube-gaz mouillé
Etat n°:	Description de l'état des tubes	G_{initial} avec G_{final}			
1	Deux tube-gaz secs	G $\Delta P_{\text{initial}}$ ΔP_{final}	$> 310 \text{ cm}^3/\text{s}$ $> 760 \text{ cm}^3/\text{s}$ $> 194 \text{ mm CE}$ $> 68 \text{ mm CE}$ irréversible	$310 \text{ cm}^3/\text{s} > G$	$> 110 \text{ cm}^3/\text{s}$
2	Un tube-gaz sec et un tube-gaz mouillé	G $\Delta P_{\text{initial}}$ ΔP_{final}	$760 \text{ cm}^3/\text{s} - 700 \text{ cm}^3/\text{s}$ $195 \text{ mm CE} - 170 \text{ mm CE}$ $80 \text{ mm CE} - 210 \text{ mm CE}$ irréversible		
3	Un tube-gaz sec et un tube avec "bullage"	G $\Delta P_{\text{initial}}$ ΔP_{final}	$700 \text{ cm}^3/\text{s} - 390 \text{ cm}^3/\text{s}$ $170 \text{ mm CE} - 63 \text{ mm CE}$ $240 \text{ mm CE} - 50 \text{ mm CE}$ réversible		
4	Un tube-gaz partiellement mouillé et un tube avec "bullage"	G $\Delta P_{\text{initial}}$ ΔP_{final}	$390 \text{ cm}^3/\text{s} - 310 \text{ cm}^3/\text{s}$ $66 \text{ mm CE} - 54 \text{ mm CE}$ $240 \text{ mm CE} - 40 \text{ mm CE}$ réversible	$310 \text{ cm}^3/\text{s} - 220 \text{ cm}^3/\text{s}$ $54 \text{ mm CE} - 45 \text{ mm CE}$ $240 \text{ mm CE} - 40 \text{ mm CE}$ irréversible	
5	Un tube-gaz mouillé et un tube avec "bullage"	G $\Delta P_{\text{initial}}$ ΔP_{final}		$220 \text{ cm}^3/\text{s} - 170 \text{ cm}^3/\text{s}$ $45 \text{ mm CE} - 42 \text{ mm CE}$ $210 \text{ mm CE} - 80 \text{ mm CE}$ irréversible	$310 \text{ cm}^3/\text{s} - 220 \text{ cm}^3/\text{s}$ $80 \text{ mm CE} - 115 \text{ mm CE}$ $210 \text{ mm CE} - 80 \text{ mm CE}$ réversible
6	Deux tubes avec "bullage"	G $\Delta P_{\text{initial}}$ ΔP_{final}		$170 \text{ cm}^3/\text{s} - 110 \text{ cm}^3/\text{s}$ $42 \text{ mm CE} - 210 \text{ mm CE}$ $240 \text{ mm CE} - 10 \text{ mm CE}$ irréversible	$220 \text{ cm}^3/\text{s} - 110 \text{ cm}^3/\text{s}$ $96 \text{ mm CE} - 210 \text{ mm CE}$ $240 \text{ mm CE} - 10 \text{ mm CE}$ réversible

- c) Transformation (I.3) pour $390 \leq G < 700 \text{ cm}^3/\text{s}$
- d) Transformation (I.4) pour $310 \leq G < 390 \text{ cm}^3/\text{s}$.

I - 221 . 1 Etude de la transformation (I.1) : (tube-liquide et tube-gaz sec) $\rightarrow$ (deux tube-gaz secs surmontés d'une couche d'eau).

On a initialement un tube-gaz sec où s'écoule un débit d'air G au moins égal à $760 \text{ cm}^3/\text{s}$, qui subit une chute de pression au moins égale à 194 mm CE , et un tube liquide où s'écoule un débit d'eau L égal à $18 \text{ cm}^3/\text{s}$, entraînant un débit d'air g_e inférieur à $25 \text{ cm}^3/\text{s}$. On diminue le débit d'eau en maintenant le débit d'air G constant ; on obtient les résultats suivants :

- Tant que le débit d'eau reste supérieur à $2 \text{ cm}^3/\text{s} \pm 0,5$, l'état du système n'évolue pas ; la variation de la chute de pression de l'air due à la variation du débit d'air entraîné g_e est négligeable, la valeur maximale de g_e est en effet très faible devant la valeur du débit d'air introduit G .

- Lorsque le débit d'eau atteint la valeur $L_d = 2 \text{ cm}^3/\text{s} \pm 0,5$, le tube-liquide se débouche et se sèche ; on coupe l'alimentation en eau ; l'état final où se place le système est alors : deux tube-gaz secs surmontés d'une couche d'eau d'environ 1 cm d'épaisseur. La chute de pression de l'air diminue brutalement et se fixe à la valeur correspondant à la chute de pression subie par un débit d'air égal à $\frac{G}{2}$ dans un tube sec surmonté d'une couche d'eau d'environ 1 cm d'épaisseur.

Pour cette transformation la chute de pression finale subie par l'air est au moins égale à 68 mm CE .

On verra ultérieurement comment se produit le débouchage du tube liquide et pourquoi, à la précision avec laquelle L_d est déterminé, le tube se débouche pour la même valeur L_d du débit d'eau ; on montrera que ce résultat n'est pas en contradiction avec les résultats reportés sur le diagramme général.

Les résultats relatifs aux variations de la chute de pression de l'air pour différents débits d'air G sont portés sur le graphique I.221.1. L'évolution du système est représentée schématiquement sur le diagramme général (fig. I.221.1). Les points I_1 et I_2 représentent respectivement les états initiaux du tube-gaz et du tube-liquide, les points F_1 et F_2 les états finaux.

La transformation (I.1) est irréversible, puisqu'à l'état final, le liquide ne peut plus s'écouler à travers le système.

I - 221 . 2 Etude de la transformation (I.2): (un tube-liquide et un tube-gaz sec) $\rightarrow$ (un tube-gaz mouillé et un tube-gaz sec surmonté d'une couche d'eau).

L'état initial est le même que précédemment, sauf que le débit d'air est plus faible, soit G compris entre $760 \text{ cm}^3/\text{s}$ et $700 \text{ cm}^3/\text{s}$ avec une chute de pression comprise entre 195 mm CE et 170 mm CE .

Quand on diminue le débit d'eau L en maintenant le débit d'air G constant, l'état du système n'évolue pas tant que le débit liquide reste supérieur à $L_d = 2 \text{ cm}^3/\text{s} \pm 0,5$.

Pour cette valeur le tube-liquide se débouche et devient tube-gaz mouillé ; on coupe l'alimentation du système en liquide ;

$$1 \quad G = 1835 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$2 \quad " = 1510 \quad "$$

$$3 \quad " = 1170 \quad "$$

$$4 \quad " = 980 \quad "$$

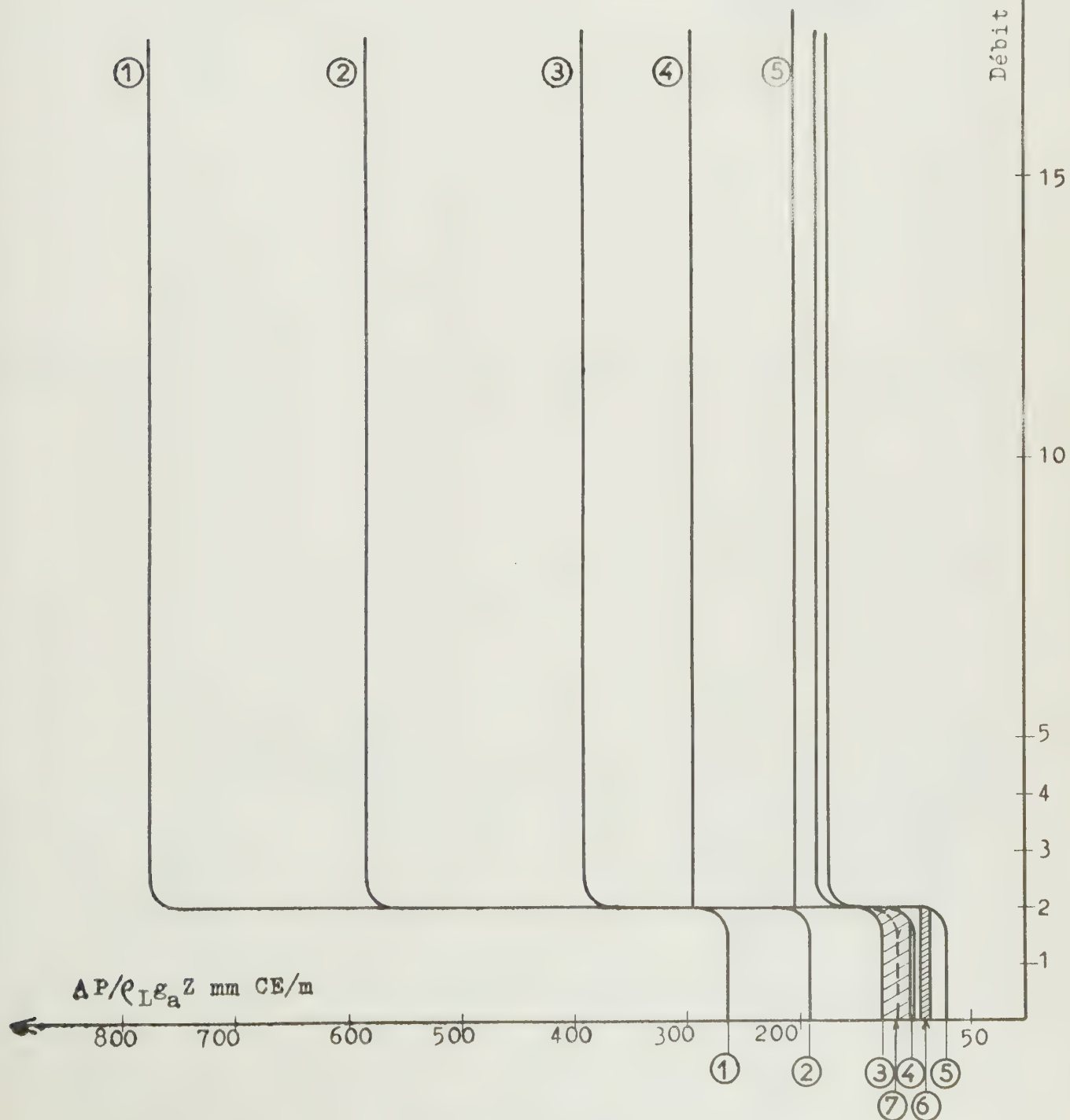
$$5 \quad " = 780 \quad "$$

Transformations (I.1)

$$6 \quad " = 740 \quad "$$

$$7 \quad " = 720 \quad "$$

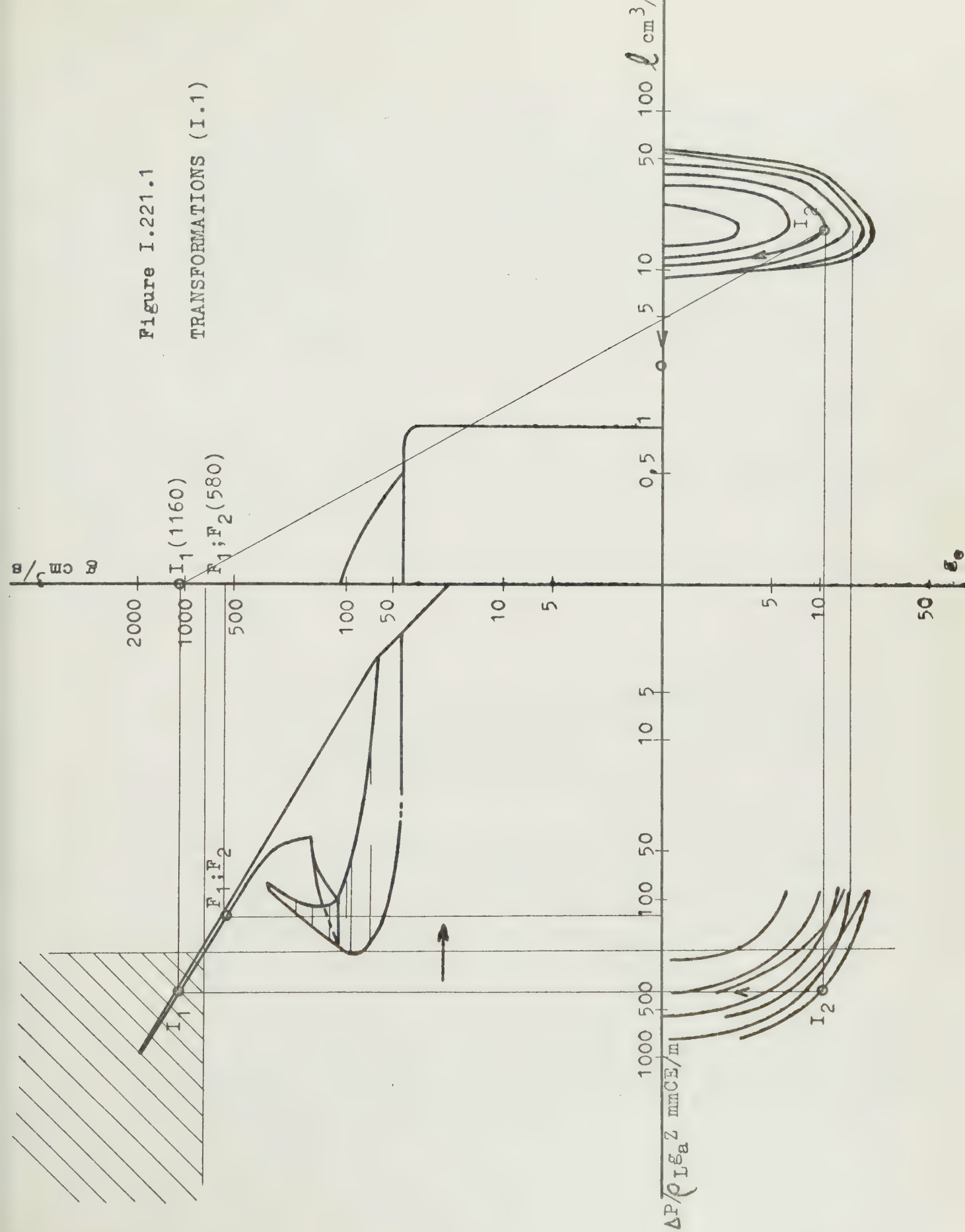
Transformations (I.2)



Graphique I.2211

Figure I.221.1

TRANSFORMATIONS (I.1)



l'état final est donc : un tube-gaz sec et un tube-gaz mouillé surmontés d'une couche d'eau d'environ 1 cm de hauteur. Le débit d'air G est alors la somme d'un débit g_g s'écoulant dans un tube sec et d'un débit g_M s'écoulant dans un tube-gaz mouillé, tels que l'air subisse la même chute de pression dans chacun des deux tubes ; pour les différentes valeurs de G vérifiant cette condition, la chute de pression finale subie par l'air prend des valeurs appartenant à la courbe donnant la variation de la chute de pression de l'air dans un tube mouillé.

Les résultats relatifs à la chute de pression de l'air pour différentes valeurs de G sont portés sur le graphique I.221.1. L'évolution du système est représentée schématiquement sur le diagramme général (fig. I.221.2).

De même que précédemment, la transformation (I.2) est irréversible.

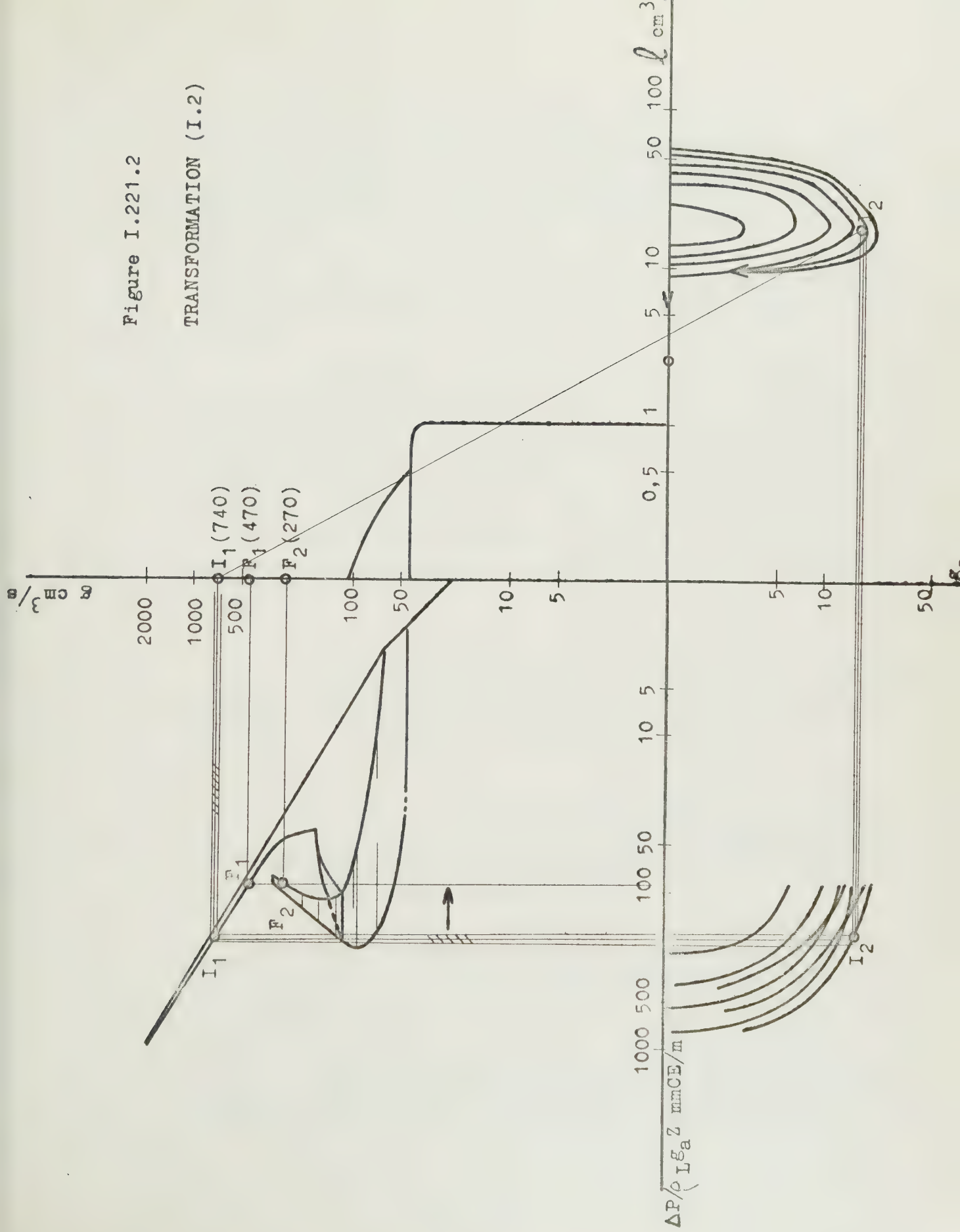
I - 221 . 3 Etude de la transformation (I.3) : (un tube-liquide et un tube-gaz sec) $\rightarrow$ (un tube-gaz sec et un tube à l'état de "bullage").

Le débit de gaz G dans le tube-gaz sec est compris entre $700 \text{ cm}^3/\text{s}$ et $390 \text{ cm}^3/\text{s}$, il subit une chute de pression comprise entre 170 mm CE et 68 mm CE. Quand on diminue le débit d'eau en maintenant le débit d'air constant, l'état du système n'évolue encore pas tant que le débit d'eau reste supérieur à $2 \text{ cm}^3/\text{s} \pm 0,5$.

Pour cette valeur, le tube-liquide se débouche et se place à un état d'écoulement limite entre l'état du tube-liquide et celui du tube-gaz à l'état de "bullage" ; ce nouvel état sera décrit ulté-

Figure I.221.2

TRANSFORMATION (I.2)



rieurement. L'état du système est donc : un tube-gaz sec et un tube à l'état de "transition". Le débit d'air G s'est partagé en un débit g_S dans le tube-gaz sec, supérieur à $310 \text{ cm}^3/\text{s}$, et en un débit g_B compris entre 44 et $110 \text{ cm}^3/\text{s}$ dans le tube à l'état de "transition".

La chute de pression de l'air subit d'importantes fluctuations entre les valeurs 50 mm CE et 240 mm CE (voir graphique I.221.3).

On continue à diminuer le débit d'eau ; le tube à l'état de "transition" se place à l'état de "bullage" lorsque la valeur du débit d'eau est telle que le point représentant les conditions de fonctionnement de ce tube sur le diagramme général appartienne au domaine IV (voir fig. I.221.3). Dans l'état final (tube-gaz sec et tube à l'état de "bullage") la chute de pression de l'air est celle subie par un débit d'air compris entre 44 et $110 \text{ cm}^3/\text{s}$ dans un tube à l'état de "bullage".

Si on augmente L à partir de sa valeur finale, le système se place au même état initial I après avoir été dans son état intermédiaire ; la transformation (I.3) est donc réversible.

I - 221 . 4 Etude de la transformation (I.4) : (tube-liquide et tube-gaz sec) $\longrightarrow$ (tube à l'état de "bullage" et tube partiellement mouillé).

Cette transformation se produit pour un débit d'air G compris entre 390 et $310 \text{ cm}^3/\text{s}$; la chute de pression de l'air initiale est comprise entre 68 et 54 mm CE .

L'évolution du système au cours de cette transformation est analogue à celle observée au cours de la transformation (I.3) : le

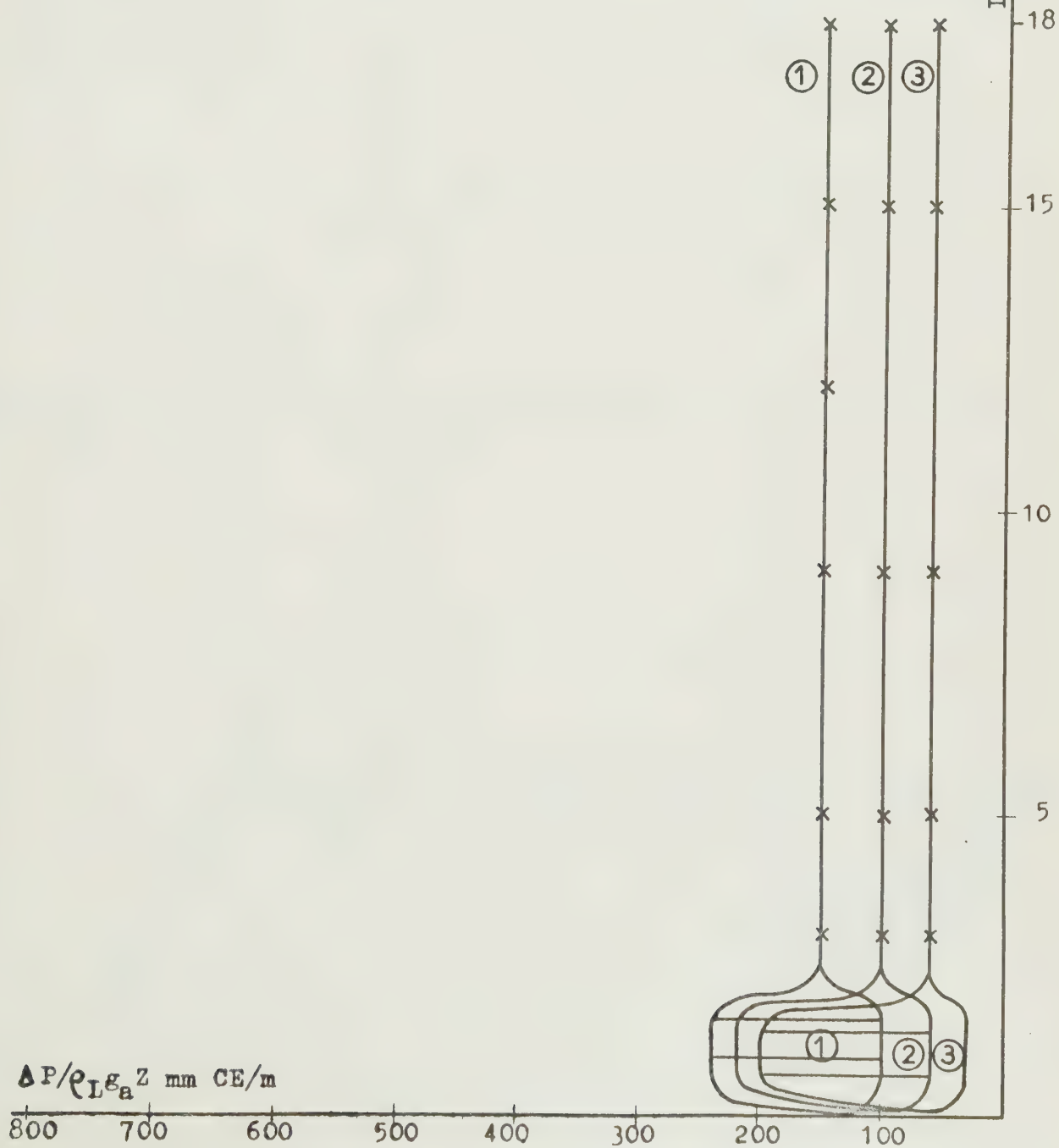
1 $G = 650 \text{ cm}^3/\text{s}$

2 $G = 500 \text{ "}$

3 $G = 340 \text{ "}$

Transformations (I.3)

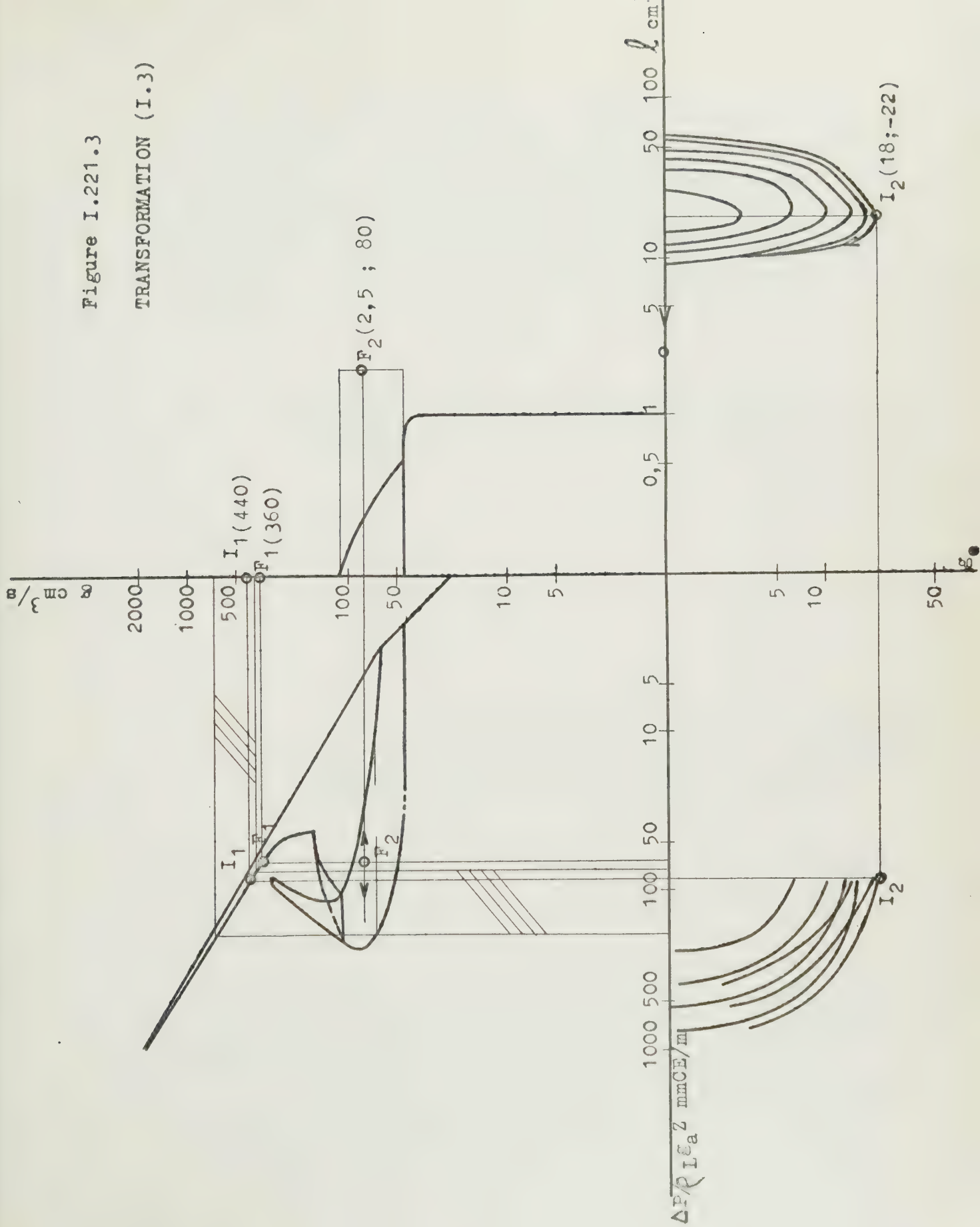
Transformation (I.4)



Graphique I.2213

Figure I.221.3

TRANSFORMATION (I.3)



tube-liquide se débouche pour $L_d = 2 \text{ cm}^3/\text{s} \pm 0,5$ et se place à l'état de "transition", en diminuant L le système se place à l'état final (4). Le débit d'air G se partage en un débit g_{PM} compris entre 300 et $210 \text{ cm}^3/\text{s}$ dans le tube partiellement mouillé et en un débit g_B compris entre 44 et $90 \text{ cm}^3/\text{s}$ dans le tube à l'état de "bullage". Les résultats sont analogues au cas (I.3) (voir graphique I.221.3 et fig. I.221.4).

I - 222 Evolution du système à partir de l'état initial II :
"tube-liquide et tube gaz partiellement mouillé".

L'expérience montre qu'on peut obtenir les trois transformations suivantes :

- a) Transformation (II.4)
- b) Transformation (II.5)
- c) Transformation (II.6).

I - 222 . 1 Etude de la transformation (II.4) : (tube-gaz partiellement mouillé et tube-liquide) $\rightarrow$ (tube-gaz partiellement mouillé et tube à l'état de "bullage").

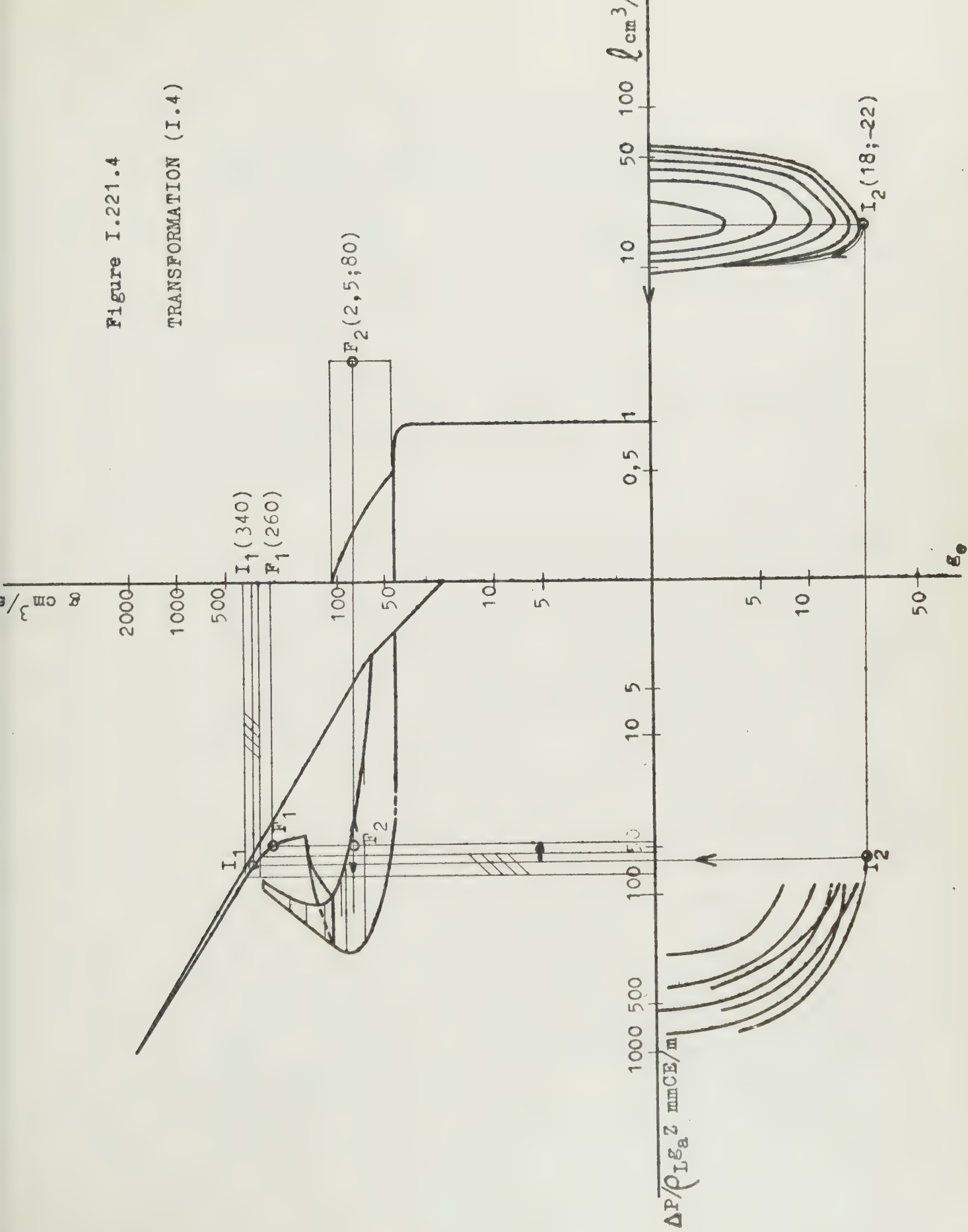
La transformation (II.4) se produit pour un débit d'air G compris entre 310 et $220 \text{ cm}^3/\text{s}$; la chute de pression de l'air initiale est comprise entre 54 mm CE et 45 mm CE.

De même que pour toutes les transformations pour lesquelles l'état final du tube-liquide est l'état de "bullage", les différentes phases de l'évolution du système vers l'état final (4) sont :

- pour les valeurs du débit d'eau L supérieures à $2 \text{ cm}^3/\text{s} \pm 0,5$ le système reste dans son état initial (II).

Figure I.221.4

TRANSFORMATION (I.4)



- pour cette valeur, le tube-liquide se débouche et se place dans l'état de "transition" et le liquide pénètre dans le tube gaz sans atteindre l'extrémité du tube qui reste partiellement mouillé.

- lorsque le débit d'eau L atteint la valeur $L_P(g)$, appartenant à la frontière du domaine IV du diagramme général, le système se place à l'état final (4) : un tube-gaz partiellement mouillé et un tube-gaz à l'état de "bullage".

Les résultats relatifs à la chute de pression sont portés sur le graphique I.222. L'évolution du système est représentée sur le diagramme général (fig. I.222.1).

I - 222 . 2 Etude des transformations (II.5) et (II.6).

La transformation (II.5) est : (tube-gaz partiellement mouillé et tube-liquide) $\rightarrow$ (tube-gaz mouillé et tube-gaz à l'état de "bullage"). Elle se produit pour un débit d'air G compris entre 220 et 170 cm^3/s ; la chute de pression de l'air initiale est comprise entre 45 et 42 mm CE.

La transformation (II.6) est : (tube-gaz partiellement mouillé et tube-liquide) $\rightarrow$ (deux tube-gaz à l'état de "bullage"). Elle se produit pour un débit d'air G compris entre 170 et 110 cm^3/s ; la chute de pression de l'air est comprise entre 42 et 210 mm CE.

Lorsque la valeur du débit d'eau L atteint $2 \text{ cm}^3/\text{s} \pm 0,5$, le tube-liquide se débouche et se place à l'état de "transition", le liquide pénètre dans le tube-gaz qui devient tube-gaz mouillé dans la transformation (II.5) et tube à l'état de "transition" dans la transformation (II.6).

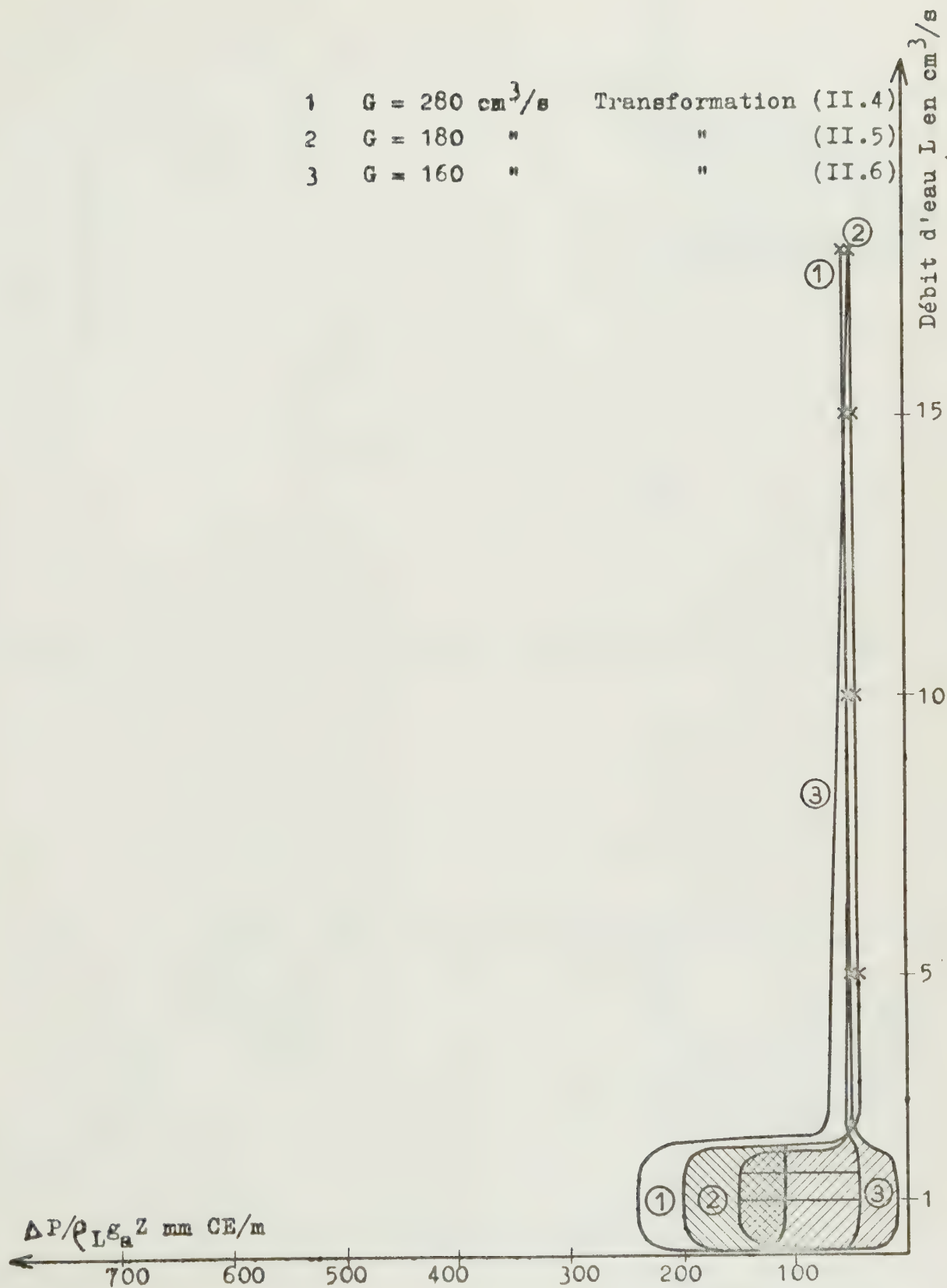
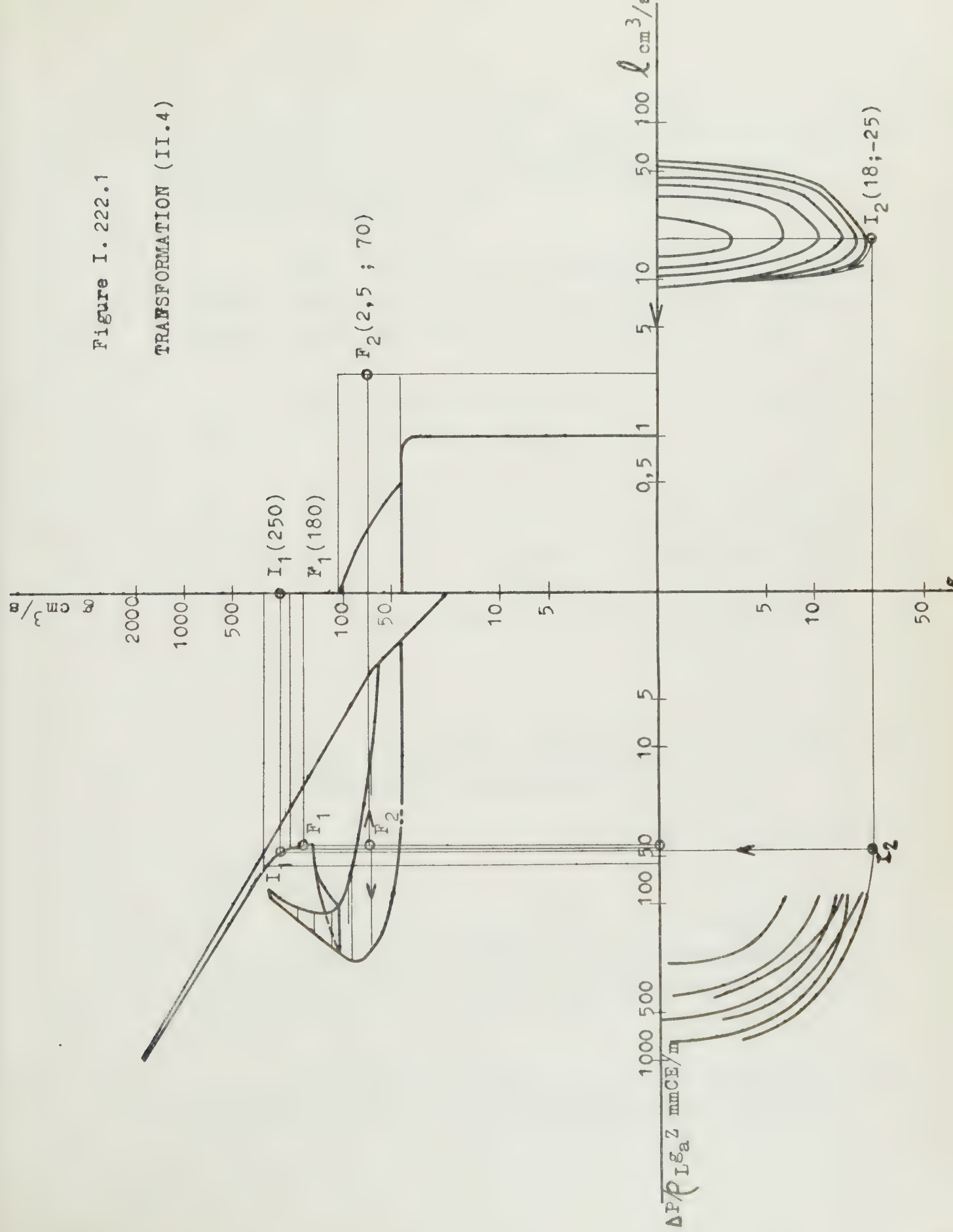


Figure I. 222.1

TRANSFORMATION (II.4)



Dans le cas de la transformation (II.5), pour une valeur $L_B(g)$ appartenant à la frontière du domaine IV du diagramme général, le système se place à son état final (5) : tube-gaz mouillé et tube à l'état de "bullage".

Dans le cas de la transformation (II.6) les deux tubes dans l'état de "transition" se placent dans l'état de "bullage" pour une valeur du débit d'eau L égale à deux fois la valeur $L_B(g)$.

Les résultats sont portés sur les figures I.222.2 et I.222.3 et sur le graphique I.222.

Si on augmente le débit d'eau L à partir de sa valeur finale, l'un des tubes se bouche et devient tube-liquide, l'autre devient tube-gaz mouillé ; le système se place dans l'état III.

Les transformations (II.5) et (II.6) sont donc irréversibles.

I - 223 Evolution du système à partir de l'état initial III :
"tube-liquide et tube-gaz mouillé".

L'expérience montre qu'il existe deux transformations possibles :

a) Transformation (III.5) $\rightarrow$ tube-gaz mouillé et tube à l'état de "bullage" pour un débit d'air G compris entre $310 \text{ cm}^3/\text{s}$ et $220 \text{ cm}^3/\text{s}$, donc pour une chute de pression de l'air comprise entre 80 mm CE et 115 mm CE .

b) Transformation (III.6) $\rightarrow$ deux tubes à l'état de "bullage" pour un débit d'air G compris entre $220 \text{ cm}^3/\text{s}$ et $110 \text{ cm}^3/\text{s}$,

Figure I.222.2

TRANSFORMATION (II.5)

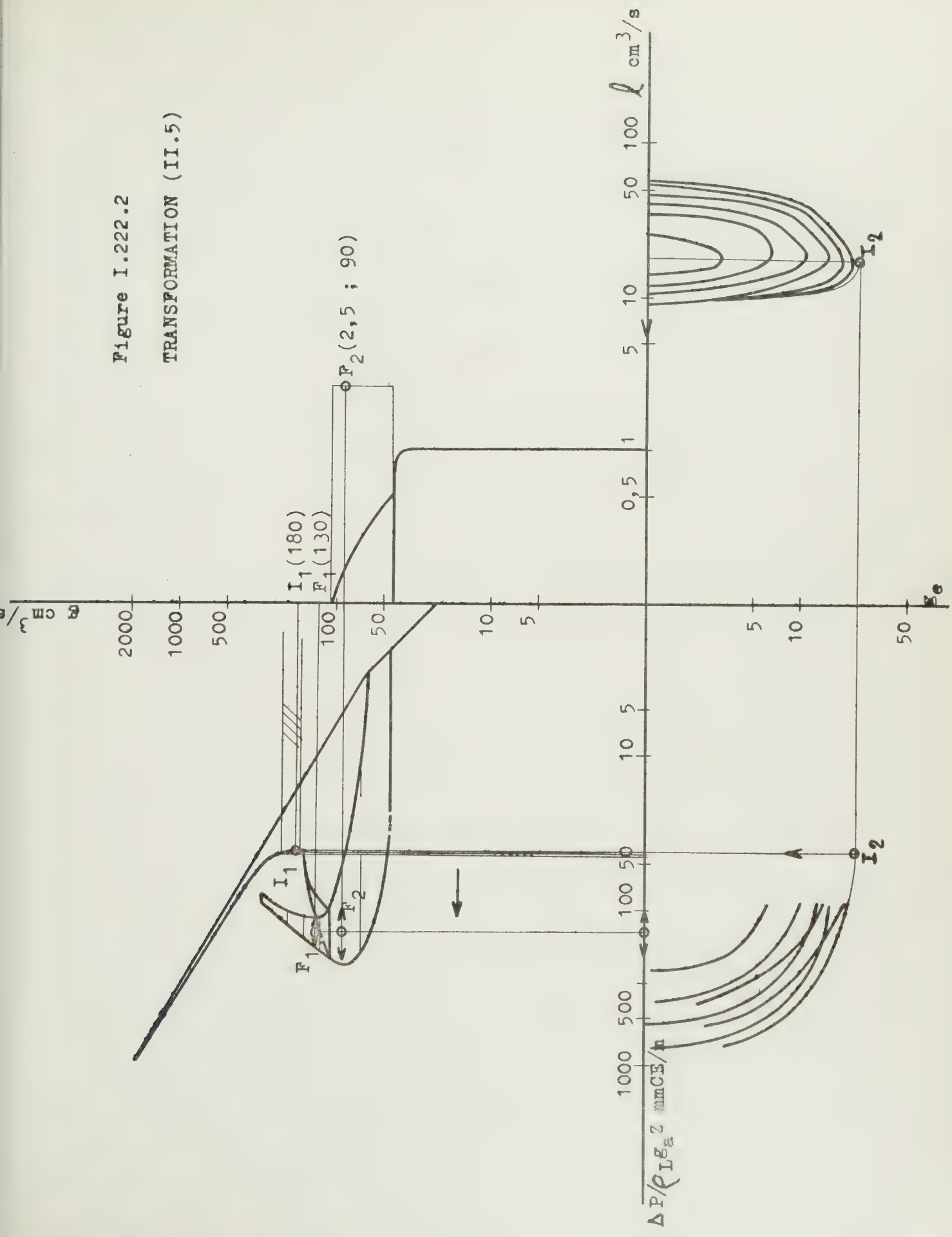
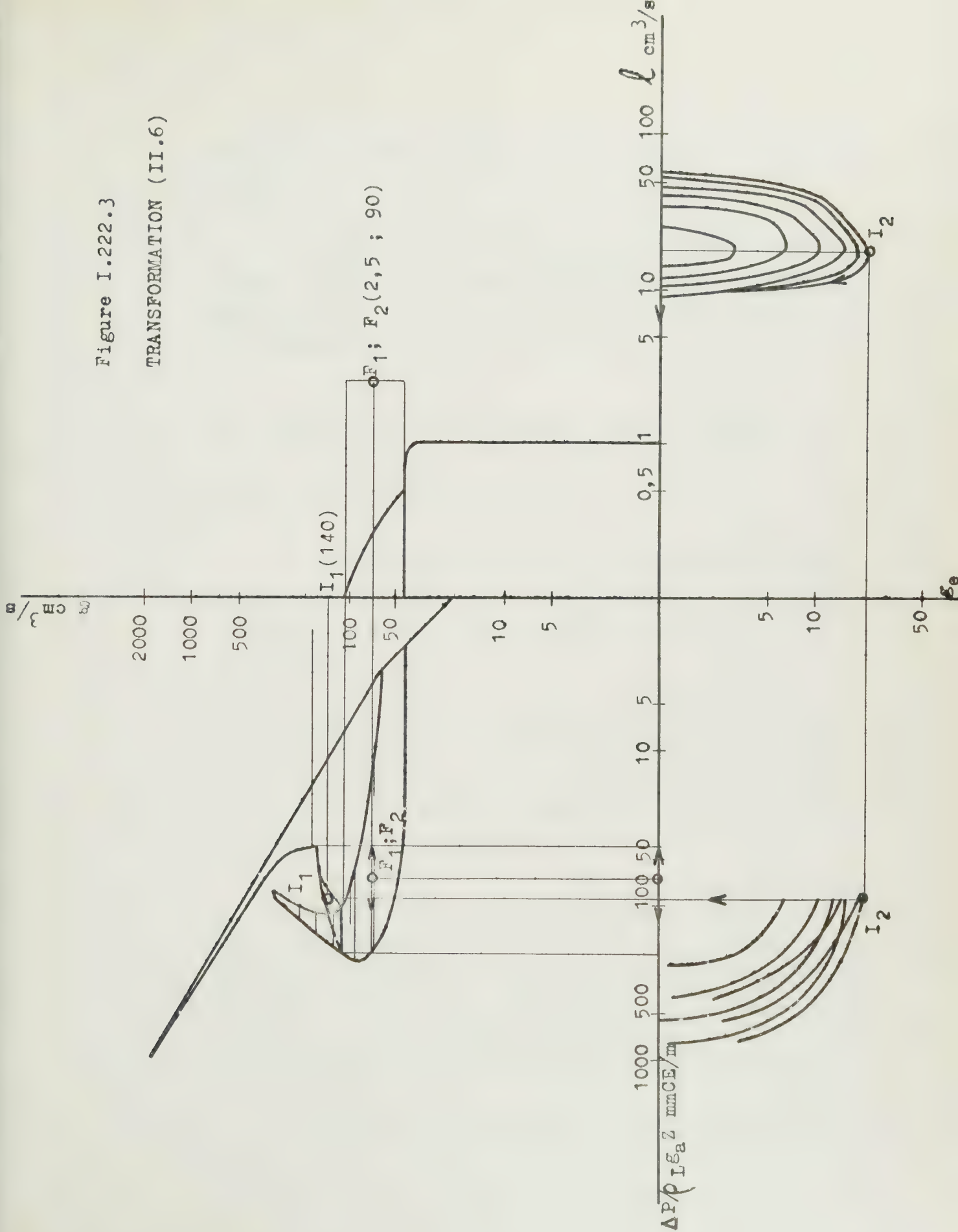




Figure I.222.3

TRANSFORMATION (II.6)



donc pour une chute de pression de l'air comprise entre 96 et 210 mm CE.

L'évolution du système pour ces deux transformations est analogue à celle obtenue pour les transformations étudiées au paragraphe précédent (voir figures I.223 a et I.223 b et graphique I.223). Ces transformations sont réversibles.

I - 23 RESULTATS RELATIFS AU DEBOUCHAGE D'UN TUBE LIQUIDE.

I - 231 Description du phénomène.

Au cours des expériences sur l'évolution du système de deux tubes, lorsque le débit d'eau atteint la valeur $L_d = 2 \text{ cm}^3/\text{s} \pm 0,5$, on observe les quatre états, représentés schématiquement sur la figure I.231, qui sont :

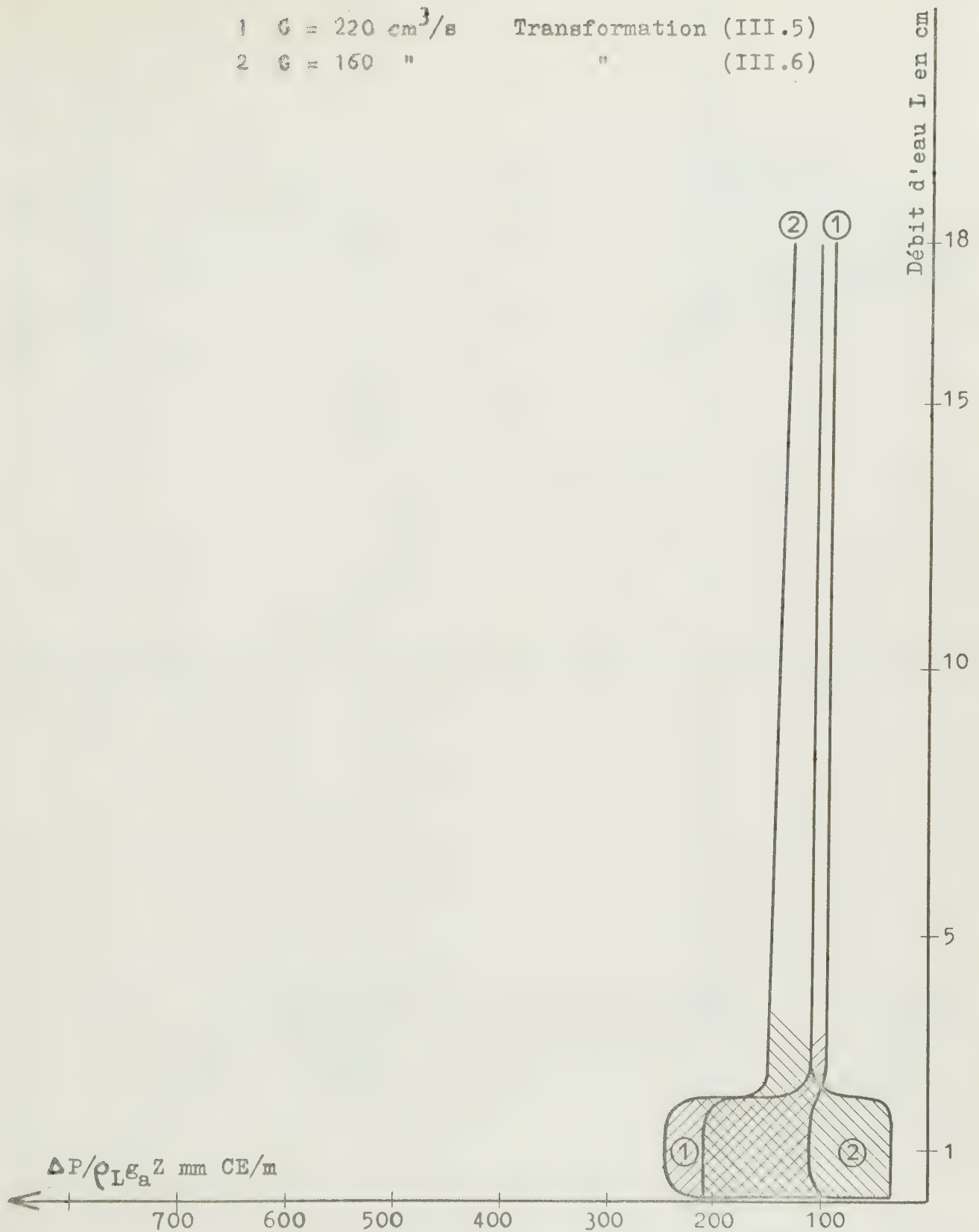
- état 1 : le tube-liquide est bouché par un piston de liquide à sa partie inférieure ; la surface de déversement du liquide est perturbée par le courant gazeux qui sort du tube-gaz. La hauteur du piston de liquide est telle qu'il équilibre la chute de pression subie par l'air dans le tube-gaz.

- état 2 : par suite de l'agitation de la surface de déversement, il y a formation d'un piston de liquide à la partie supérieure du tube et emprisonnement d'une bulle d'air entre les deux pistons supérieur et inférieur. La colonne formée par la bulle d'air et les deux pistons de liquide descend à l'intérieur du tube ; la hauteur du piston inférieur diminue, celle du piston supérieur augmente.

- état 3 : lorsque la bulle atteint la base du tube, il se

1 $G = 220 \text{ cm}^3/\text{s}$
 2 $G = 160 \text{ "}$

Transformation (III.5)
 " (III.6)



Graphique I.223

TRANSFORMATION (III.5)

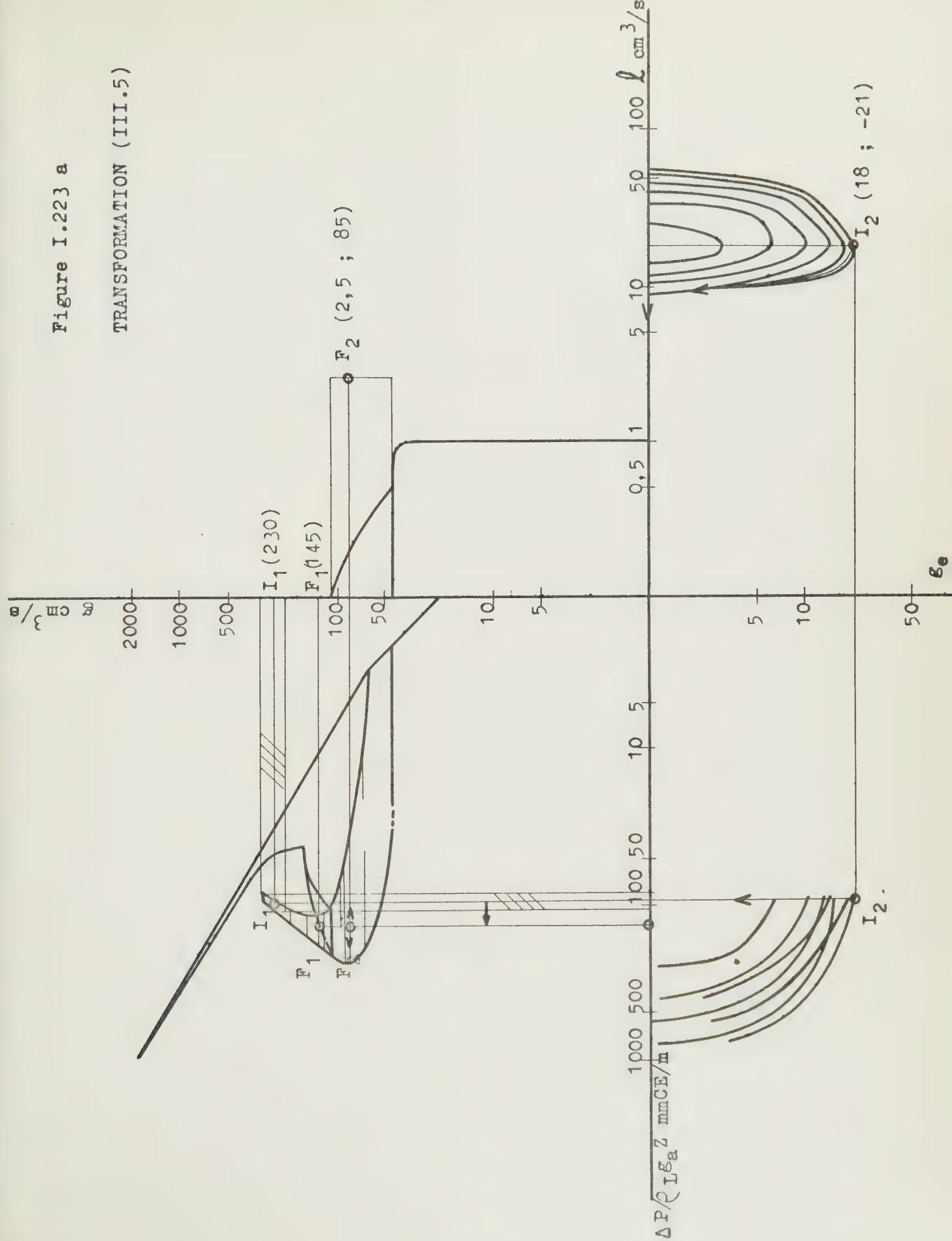
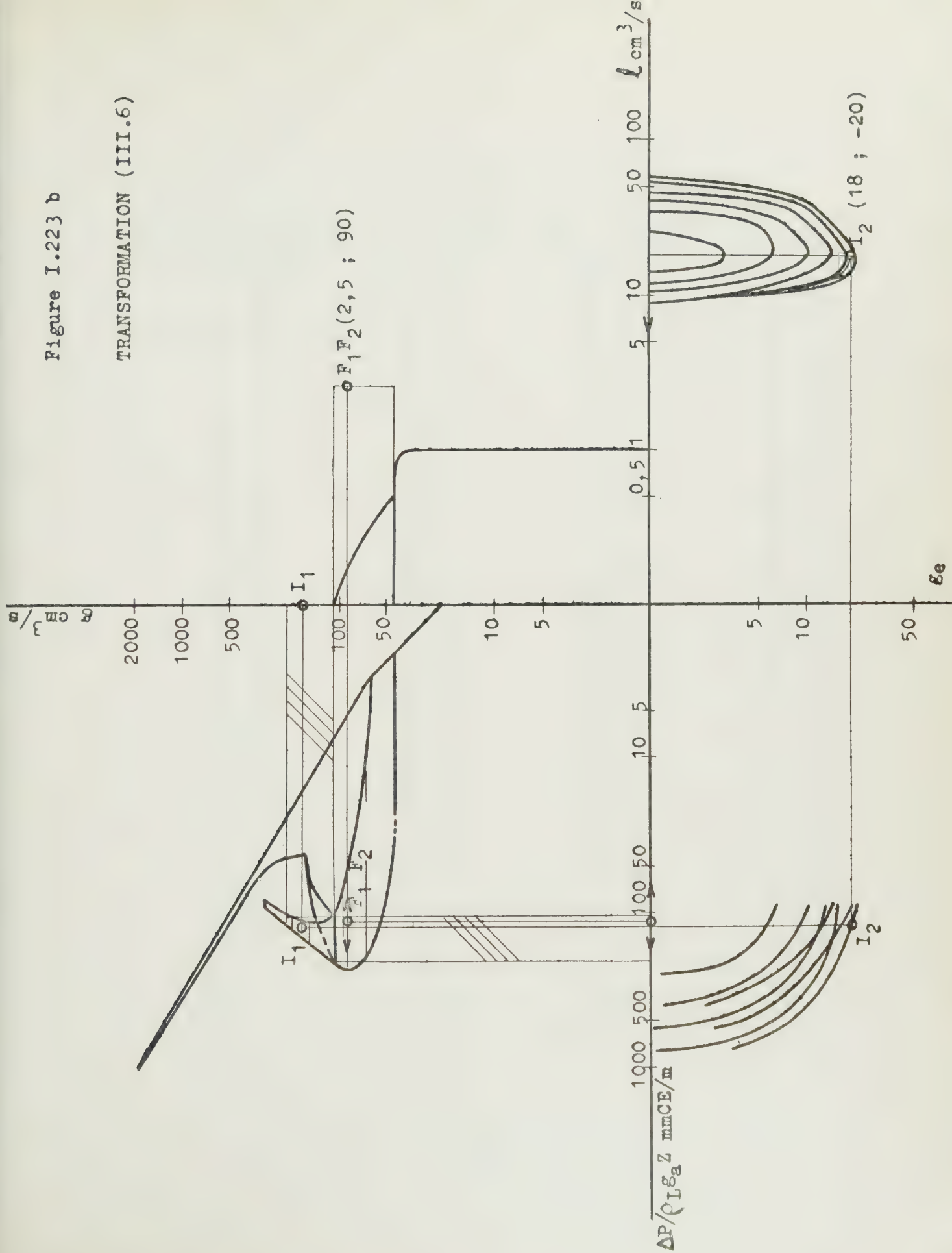


Figure I.223 b

TRANSFORMATION (III.6)



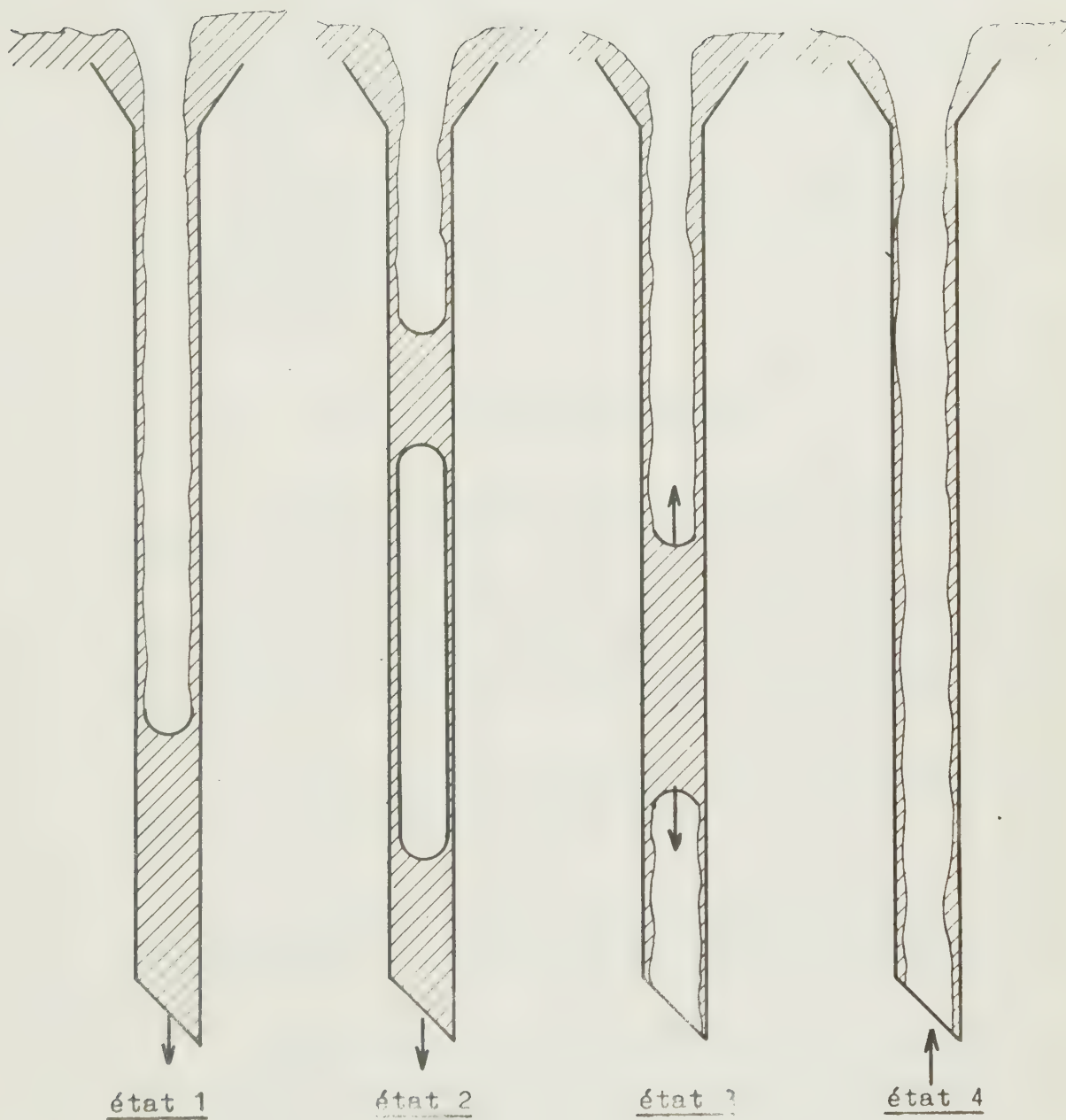


Figure I.231

produit une variation brusque de la pression de l'air qui résulte d'une part de l'augmentation due au passage de l'air de l'intérieur du tube dans le pot inférieur et, d'autre part, de la diminution due à l'éclatement de la bulle ; ceci provoque une variation brusque de la vitesse du piston de liquide qui se met à osciller.

- état 4 : pour la valeur L_d du débit d'eau, les oscillations du piston liquide s'amplifient et le piston liquide est refoulé vers le sommet du tube qui se débouche.

I - 232 Discussion des résultats.

Le débouchage d'un tube-liquide monté en parallèle d'un tube-gaz est à rapprocher des deux phénomènes suivants :

- le bouchage d'un tube unique, qui détermine le passage de l'écoulement "film ridé - contre-courant central de gaz" à l'écoulement périodique de pistons de liquide et de bulles de gaz à contre-courant.

- l'apparition de l'entraînement d'air par un écoulement d'eau par déversement dans un tube unique.

Le bouchage du tube, étudié au paragraphe I.131.2 est lié à la formation d'un piston de liquide à la partie inférieure du tube.

L'apparition de l'entraînement d'air par un écoulement d'eau dans un tube unique, étudiée au paragraphe I.133.1, est liée à la formation d'un piston liquide à la partie supérieure du tube, la surface de déversement du liquide étant lisse.

Le débouchage d'un tube-liquide monté en parallèle d'un

tube-gaz est lié à l'agitation de la surface de déversement provoquée par le courant gazeux sortant du tube-gaz, c'est-à-dire à la formation de pistons de liquide à la partie supérieure du tube pour de faibles débits d'eau.

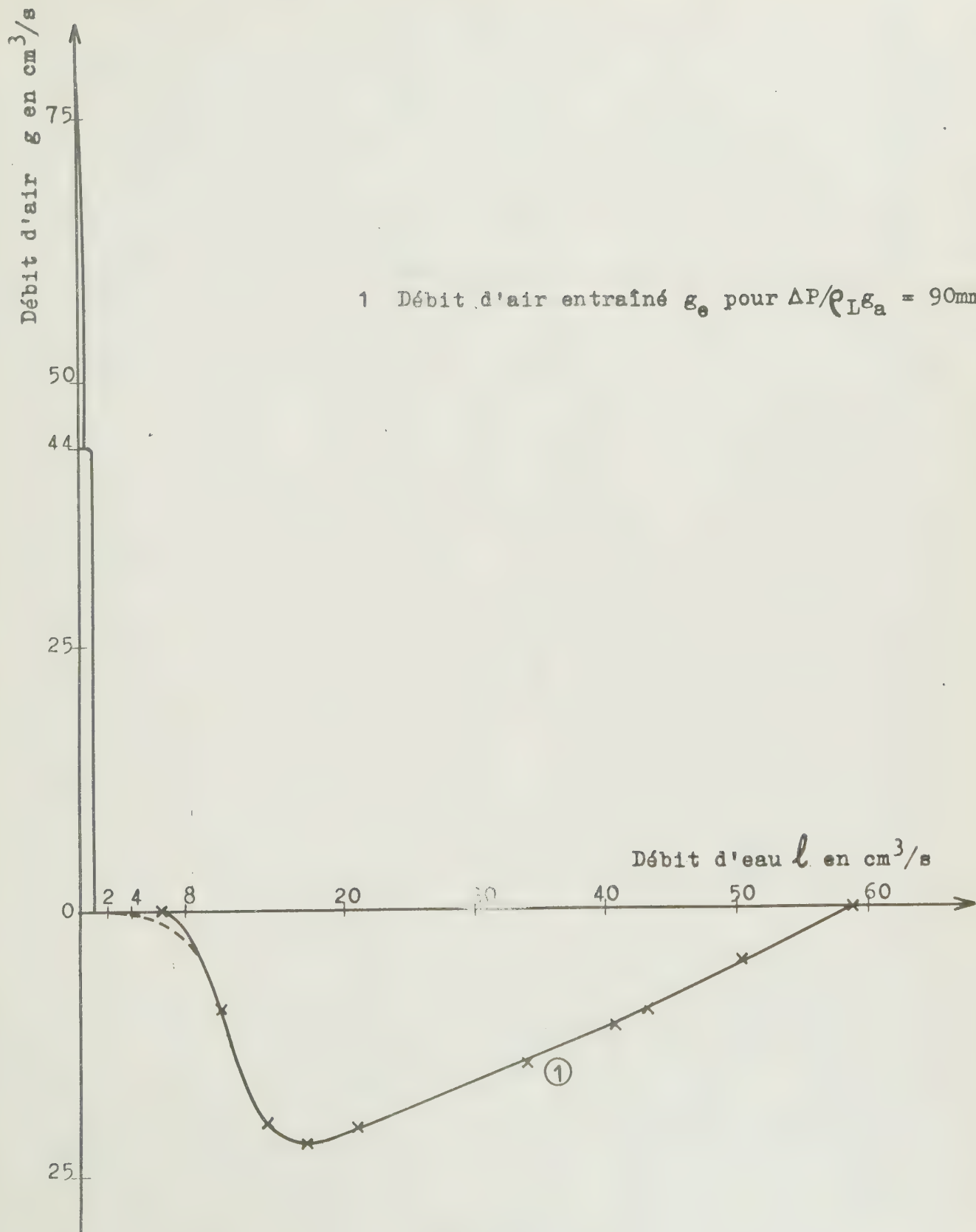
Pour les débits d'eau inférieurs à ℓ_0 , l'état du tube liquide (voir paragraphe I.133.1), lorsqu'il est seul, est différent de l'état du tube liquide monté en parallèle d'un tube-gaz pour lequel on a entraînement aléatoire de bulles d'air, dû à l'agitation de la surface de déversement ; dans ce domaine le débit d'air entraîné n'est donc pas rigoureusement nul, les points représentant l'état du tube dans ces conditions ne sont pas sur l'axe des débits d'eau, mais au voisinage de cet axe ; l'allure de la courbe $g_e(\ell)$ limitant le domaine VI pour un système de deux tubes est, pour ℓ inférieur à ℓ_0 , différente de celle obtenue avec un tube seul (voir graphique I.232 a). De plus, la retenue liquide β_L , pour ℓ compris entre L_d et ℓ_m , tend vers la valeur représentée par la hauteur du piston équilibrant la surpression imposée (graphique I.232 b). Il n'est pas possible de mesurer le débit d'air entraîné dans un système de deux tubes ; en première approximation, le réseau de courbes $g_e(\ell)$ obtenu dans le cas d'un seul tube sera utilisé dans la suite de ce travail.

L'expérience montre que la valeur du débit de débouchage L_d ne dépend pas du débit d'air G s'écoulant dans le tube-gaz.

D'après la relation :

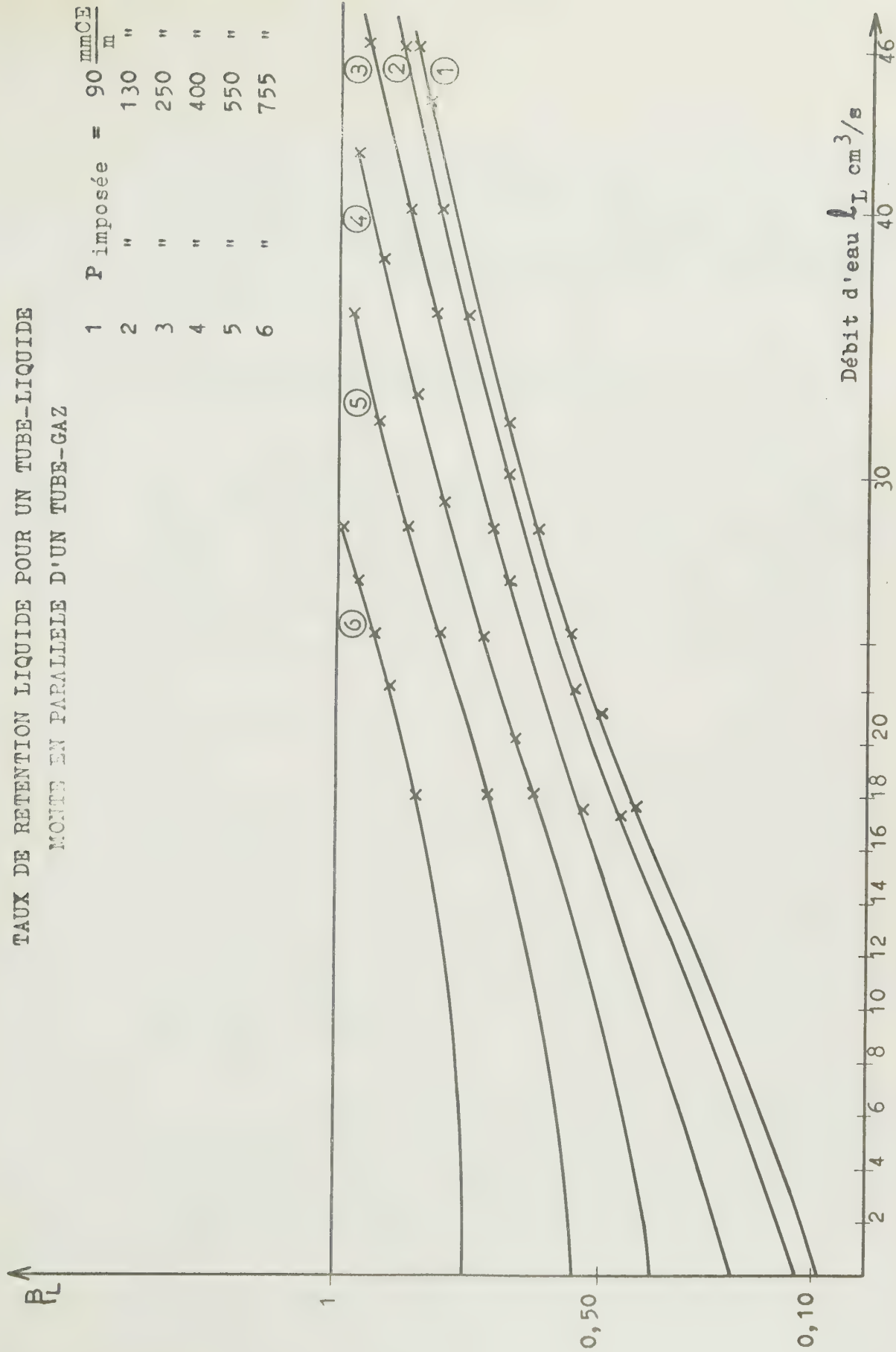
$$Z \beta = \Delta H_{\text{imposée}} + \Delta H_{\text{frottement}} + \frac{u_L^2}{2 g_a}$$

établie au paragraphe I.133.3, cela signifie que les oscillations



Graphique I.232 a

TAUX DE RETENTION LIQUIDE POUR UN TUBE-LIQUIDE
MONTÉ EN PARALLELE D'UN TUBE-GAZ



Graphique I.232 b

du piston liquide provoquées par la variation brusque de pression de l'air lorsque la bulle d'air atteint la base du tube, ne sont amplifiées que lorsque le terme $\Delta H_{\text{frottement}}$ du second membre, terme d'amortissement fonction de la vitesse du liquide, est négligeable.

I - 24 DOMAINE D'ÉCOULEMENT DE "TRANSITION".

Les expériences sur l'évolution d'un système de deux tubes ont permis d'obtenir le résultat suivant : lorsque le débit d'eau atteint la valeur $L_d = 2 \text{ cm}^3/\text{s} \pm 0,5$, le tube liquide se débouche, le débit d'air G se partage en un débit g_1 dans le tube-gaz et en un débit g_2 dans le tube-liquide débouché de telle sorte que la chute de pression de l'air soit la même dans chaque tube.

Deux cas sont à considérer :

1) si g_2 est supérieur ou égal à $110 \text{ cm}^3/\text{s}$, le tube-liquide devient tube-gaz avec un débit d'eau nul ; si on coupe l'alimentation en eau, on a, à l'état permanent, deux tube-gaz.

2) si g_2 est inférieur à $110 \text{ cm}^3/\text{s}$, le tube-liquide débouché se place à l'état de "transition" qui est un état limite entre l'état de tube-liquide et l'état de "bullage". Cet état comprend les deux phases suivantes :

1 - le tube-liquide se débouche, un débit d'air g_2 et un débit d'eau $\ell_B(g_2)$ inférieur à $0,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ s'écoulent à contre-courant dans le tube ; tout le liquide ne s'écoule donc pas, il y a accumulation de liquide au-dessus du sommet du tube.

2 - le tube se bouche, un débit d'air entraîné g_e et un débit d'eau supérieur à L_d s'écoulent à co-courant descendant dans le tube, le liquide accumulé s'écoule dans le tube, le débit d'eau tend vers la valeur L_d ; lorsqu'il atteint cette valeur, le tube se débouche à nouveau.

On détermine ainsi sur le diagramme (l, g) le domaine VII correspondant à ce nouvel état du système (graphique I.24).

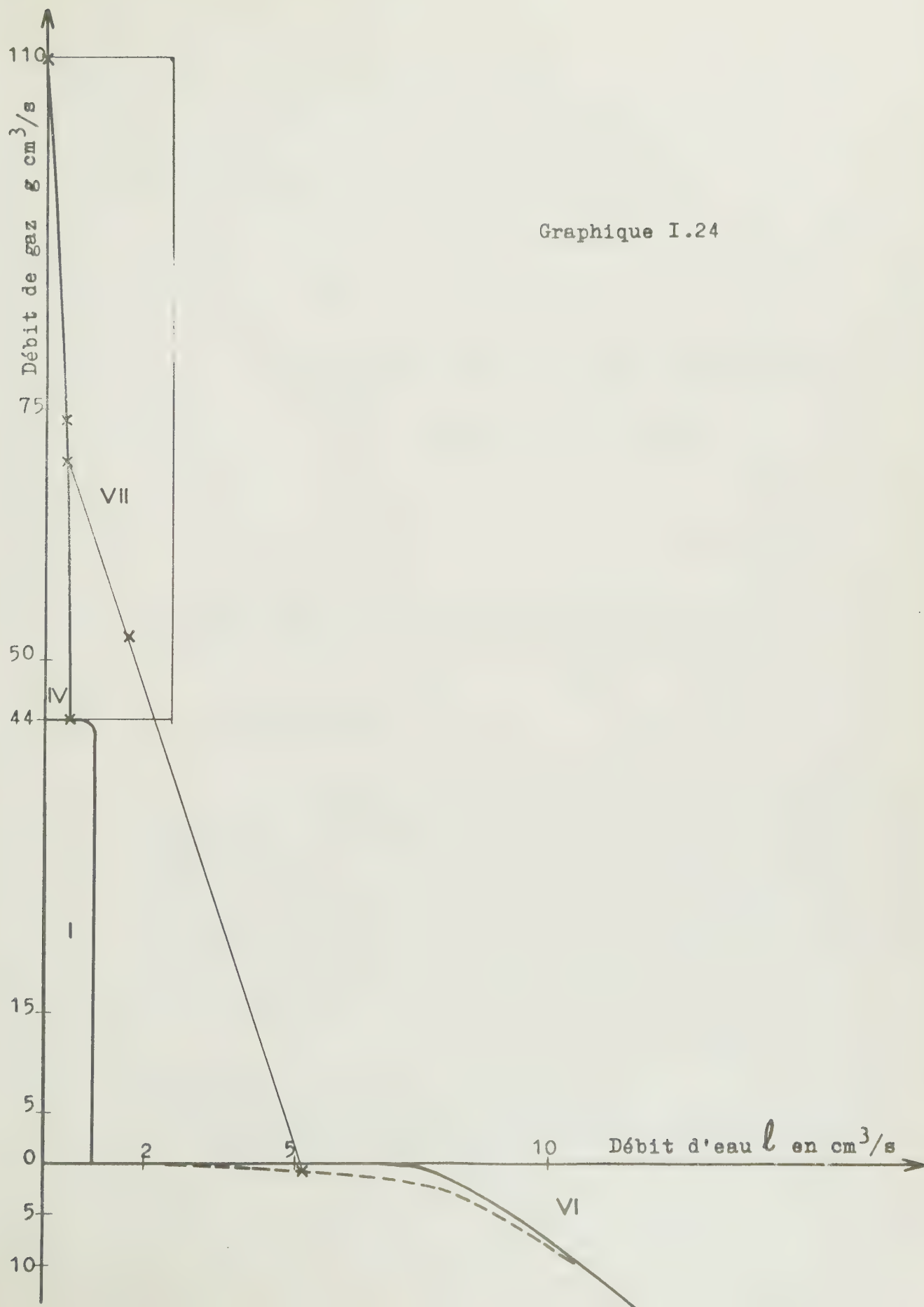
Un tube à l'état de "transition", à fonctionnement périodique, est équivalent à un système de deux tubes, l'un fonctionnant comme tube-liquide et l'autre comme tube-gaz à l'état de "bullage" (graphique I.24).

I - 25 CONCLUSION.

Le système de deux tubes montés en parallèle a permis d'observer les caractéristiques de l'écoulement gaz-liquide dans un tube placé dans des conditions de fonctionnement très proches de celles d'un tube du faisceau, de voir l'évolution des propriétés hydrodynamiques d'un tube due à la présence d'un tube voisin et d'obtenir ainsi des résultats nouveaux, nécessaires à l'interprétation du fonctionnement d'un faisceau de 126 tubes.

-:-:-:-

Graphique I.24



C h a p i t r e I - 3

-:-:-

ETUDE DE L'ECOULEMENT GAZ-LIQUIDE A CONTRE-COURANT

DANS UN FAISCEAU DE TUBES

--:-:-

I - 31 DESCRIPTION DU POSTE D'ETUDE DU FAISCEAU DE TUBES.

I - 311 Introduction.

Au début de notre travail, nous avons disposé d'un appareil réalisé par B. LESPINASSE pour l'étude générale du fonctionnement hydrodynamique et de l'efficacité du transfert dans les colonnes à garnissage. L'adaptation de cet appareil à l'étude des propriétés hydrodynamiques d'un faisceau de tubes nécessita d'importantes transformations ; de plus, un circuit de recyclage du liquide est venu enrichir considérablement le poste d'étude existant.

I - 312 Vue d'ensemble de l'appareil.

La figure I.312 représente schématiquement l'ensemble du

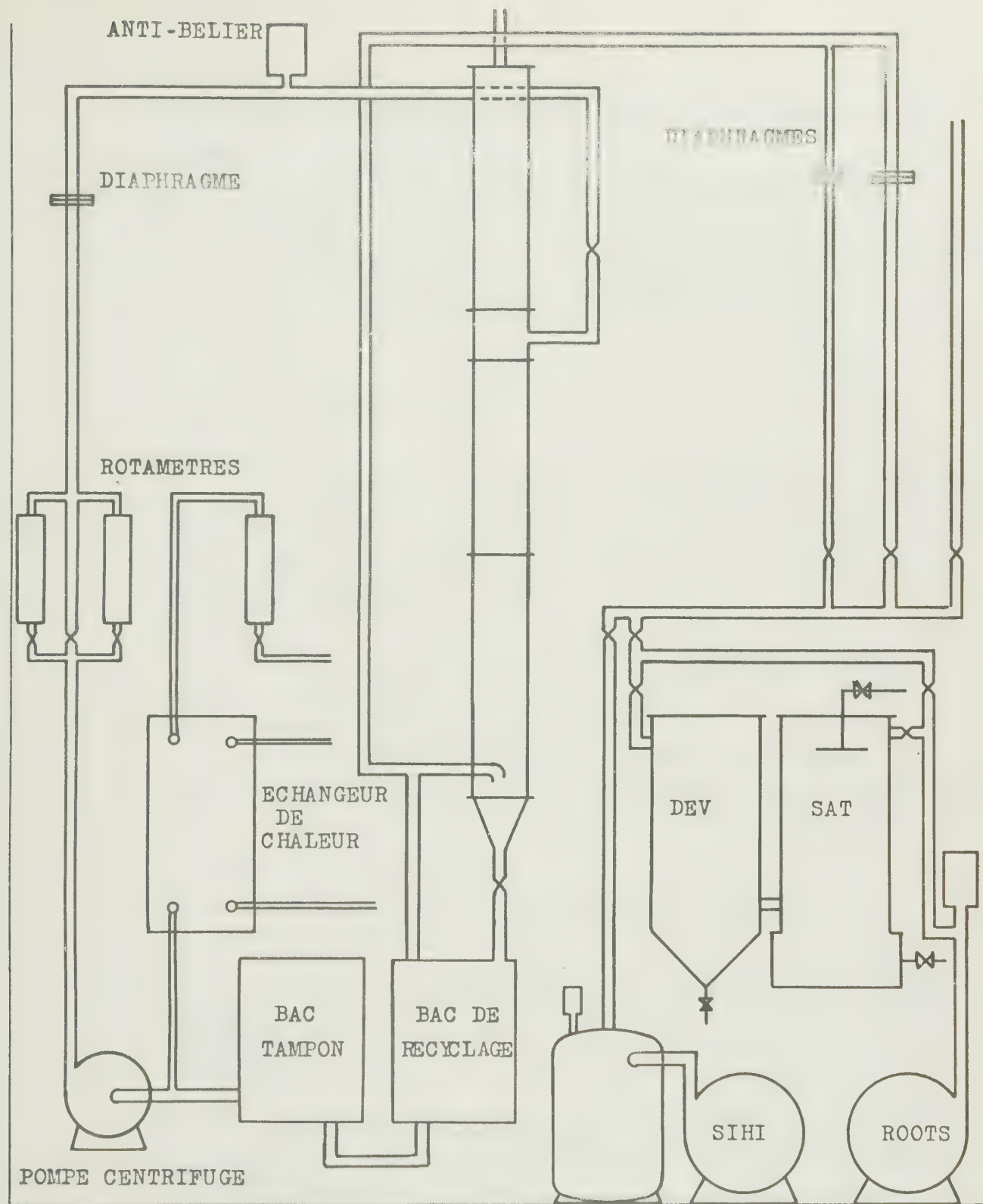


Figure I.312 VUE D'ENSEMBLE DE L'APPAREIL

poste d'étude qui s'étend sur trois étages et qui comprend trois parties :

- la colonne proprement dite où est monté le faisceau de tubes.
- les appareils annexes qui alimentent cette colonne en fluide.
- les appareils de mesure des grandeurs étudiées.

I - 313 La colonne.

La colonne a une hauteur de trois mètres ; sa section intérieure est un carré de 20 cm de côté. Les considérations qui ont présidé au choix de sa forme et de ses dimensions sont reportées dans la thèse de B. LESPINASSE.

Elle comprend trois parties qui sont de bas en haut :

- une section calmante inférieure.
- la section de mesure où est monté le garnissage.
- une section supérieure contenant les prises de pressions.

I - 313 . 1 La section calmante inférieure.

La section calmante inférieure est destinée à uniformiser l'écoulement du gaz sous le garnissage. Réalisée en tôle d'acier inoxydable de 1 mm d'épaisseur, elle a une hauteur de 1 m.

A sa base se trouve l'entrée du gaz qui est normale à la paroi et qui se situe à 90 cm du sommet de la section calmante. Le gaz dispose donc de cette distance pour que son écoulement s'uniformise et que l'effet des tourbillons dus à l'entrée soit annulé.

Au-dessous de l'entrée d'air se trouve un réceptacle transparent qui est destiné à recevoir l'eau contenue dans le garnissage lors de la mesure de la retenue liquide de colonne.

La section calmante renferme des appareils destinés à mesurer la pression statique en-dessous du garnissage.

I - 313 . 2 La section de mesure.

Elle est représentée sur la figure I.313.2. Elle a un mètre de hauteur et comprend deux parties :

- la partie supérieure de 20 cm de hauteur est réalisée en lucoflex non transparent de 10 mm d'épaisseur.

- la partie inférieure de 80 cm de hauteur est réalisée en chlorure de polyvinyle transparent de 5 mm d'épaisseur. La transparence du chlorure de polyvinyle permet d'observer l'aspect de l'écoulement des fluides à travers le garnissage.

L'entrée du liquide alimentant la colonne se trouve à la partie supérieure.

Le faisceau comprend 126 tubes, nombre maximal de tubes, ayant les caractéristiques données au paragraphe I.121, que l'on peut placer dans la colonne. Ne considérant l'écoulement à deux phases qu'à l'intérieur des tubes, il fut nécessaire de réaliser une étanchéité parfaite à l'extérieur des tubes en-dessous du niveau d'alimentation en liquide pour que le liquide et le gaz ne puissent s'écouler qu'à l'intérieur des tubes. En conséquence, on utilise le montage suivant : une plaque en caoutchouc mousse de 5 mm d'épaisseur et deux plaques en acier inoxydable sont percées de 126 trous

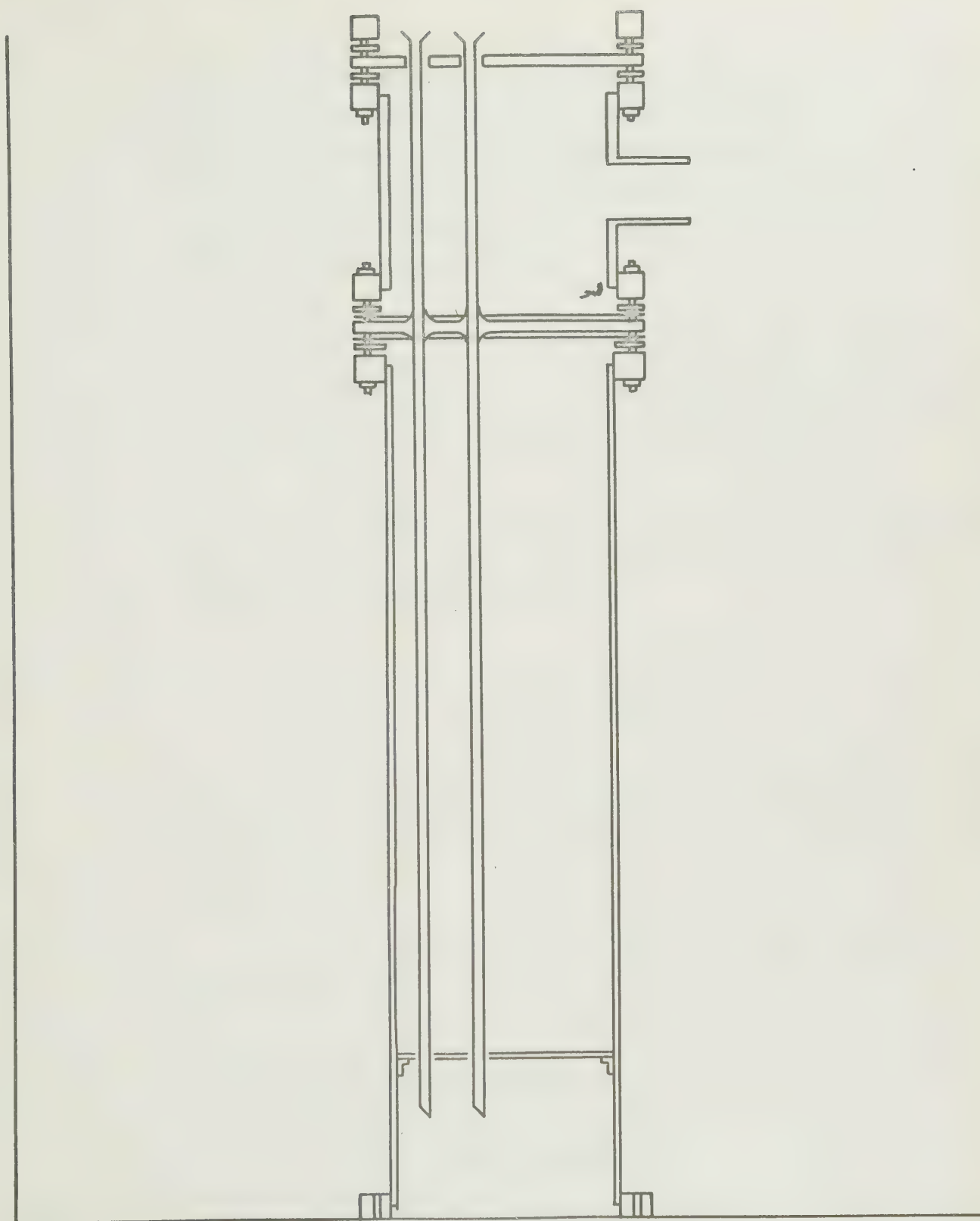


Figure I.3132 SECTION DE MESURE COMPRENANT 126 TUBES

de 10,5 mm de diamètre ; la plaque en caoutchouc est placée entre les plaques en acier inoxydable et les 126 tubes sont introduits dans les 126 trous de chacune des trois plaques. L'étanchéité est obtenue par l'écrasement de la plaque en caoutchouc sur la circonférence de chaque tube lors du serrage des trois plaques entre les brides des deux éléments de la section de mesure.

Pour assurer au tube une position approximativement verticale, deux autres plaques percées de trous de 12 mm de diamètre sont placées l'une au sommet de la section de mesure, l'autre à sa base ; les tubes passent dans les trous de ces deux plaques.

Les sommets de tous les tubes sont placés dans un même plan horizontal, ce qui assure la répartition la plus uniforme possible des débits de liquide dans chaque tube.

I - 313 . 3 La section supérieure.

La section supérieure a une hauteur de 1 m ; elle est réalisée en chlorure de polyvinyle transparent de manière à rendre possible l'observation de la distribution du liquide au sommet du faisceau de tubes.

Cette section contient la prise de pression statique au-dessus du garnissage.

I - 314 Les circuits de fluide.

I - 314 . 1 Le circuit d'eau.

La colonne est alimentée en liquide par une pompe centri-

fuge permettant d'obtenir des débits de $0,25 \text{ m}^3/\text{h}$ à $20 \text{ m}^3/\text{h}$ sous une hauteur manométrique de 18 m d'eau. A la sortie de la pompe, le débit de liquide est mesuré par une batterie de rotamètres pour les faibles et moyens débits et par un diaphragme pour les forts débits.

Le liquide entre dans la colonne, se déverse à l'intérieur des tubes et s'écoule dans le bac de recyclage ; un bac tampon fut placé entre le bac de recyclage et la pompe.

Le liquide véhiculé par la pompe provient d'une part du bac de recyclage et, d'autre part, des conduites générales d'eau de la ville. Cette eau fraîche dont le débit est mesuré par un rotamètre passe dans un échangeur de chaleur à vapeur avant d'être mélangée à l'eau recyclée à la sortie du bac tampon avant l'entrée dans la pompe.

Toutes les parties du poste d'étude en contact avec la phase liquide sont réalisées en acier inoxydable ou en chlorure de polyvinyle ; ces matériaux ont été choisis pour leur résistance à la corrosion en présence de solution acide ou basique de concentration moyenne. Les canalisations principales du circuit d'eau sont des tubes d'acier inoxydable de 50/53.

I - 314 . 2 Le circuit d'air.

Le circuit d'air est branché sur une conduite générale d'alimentation en air du laboratoire ; cet air est fourni soit par un surpresseur volumétrique Roots capable de débiter $250 \text{ m}^3/\text{h}$ sous une pression de 600 g/cm^2 , soit par une pompe à anneau liquide montée en compresseur, capable de débiter $340 \text{ m}^3/\text{h}$ sous une pression de 500 g/cm^2 .

Les canalisations d'air de notre poste d'étude sont des tubes d'acier galvanisé de 50/60.

L'air traverse un échangeur de chaleur à contact direct et un dévésiculeur garni d'un rouleau de treillage plastifié. Cet ensemble qui permet de régler la température de l'air peut être court-circuité.

Le débit d'air réglé au moyen de deux robinets vanne, l'un en série sur la canalisation, l'autre en dérivation vers l'atmosphère, est mesuré à l'aide d'une série de diaphragmes construits selon la norme AFNOR NF x 10101.

I - 315 Les appareils de mesure.

L'appareil que nous avons repris et transformé permet la mesure de la chute de pression subie par l'air circulant seul, à co-courant ou à contre-courant d'eau, et de la retenue dynamique de colonne.

I - 315 . 1 Mesure de la chute de pression de l'air.

La chute de pression subie par l'air à travers le faisceau de tubes est la différence des pressions statiques mesurées au-dessous et au-dessus du faisceau. Pour mesurer ces pressions statiques deux tubes de PRANDTL sont placés verticalement dans la section calmante et dans la section supérieure de la colonne à une dizaine de centimètres des extrémités du garnissage. Il a été nécessaire de placer sur les tubes de PRANDTL des entonnoirs destinés à empêcher l'eau de ruisseler et de boucher les trous percés dans ces tubes.

Les caractéristiques détaillées de ces prises de pression sont reportées dans les documents annexes à la thèse de B. LESPINASSE.

La différence de pression est mesurée sur des manomètres à eau.

I - 315 . 2 Mesure de la retenue de colonne.

La mesure de la retenue dynamique de colonne consiste à recueillir l'eau contenue dans le faisceau de tubes en fonctionnement. Il est donc nécessaire de pouvoir fermer simultanément l'alimentation en liquide de la colonne et l'évacuation dans le bac de recyclage.

Sur la conduite d'alimentation en eau de la colonne est placé un robinet à fermeture rapide du type robinet à boule. La fermeture de ce robinet entraînant de violents coups de béliers, un pot antibélier à coussin d'air a été placé en amont sur la canalisation. A la base de la section calmante est également monté un robinet à fermeture rapide, du type robinet à papillon.

A la fermeture simultanée des robinets à fermeture rapide, l'eau s'accumule dans le réceptacle, situé à la base de la section calmante. Quand la retenue de colonne est collectée, l'eau contenue dans le réceptacle est recueillie par un orifice percé dans le corps du robinet, juste au-dessus du papillon.

I - 315 . 3 Mesure des températures et des pressions des fluides.

La température de l'eau est mesurée avant son entrée dans la

colonne et à la sortie de la colonne. La température de l'air est mesurée en amont du diaphragme et au-dessus du faisceau de tubes.

La pression de l'air est mesurée 80 cm en amont du diaphragme.

Les pressions de l'air en amont et en aval du diaphragme, nécessaires au calcul du débit, sont également mesurées. Les prises de pression sont reliées aux branches de manomètres à eau.

Le taux d'humidité de l'air est contrôlé à l'aide d'un psychromètre à thermomètre humide monté sur la canalisation.

I - 32 RESULTATS EXPERIMENTAUX.

I - 321 Les fonctionnements "réversibles" et "irréversibles" : caractères généraux.

Les résultats obtenus au cours d'essais préliminaires sur la reproductibilité des propriétés hydrodynamiques du faisceau de tubes nous ont conduit à étudier la variation de la chute de pression de l'air et la retenue liquide de garnissage en fonction du débit d'eau suivant deux modes opératoires fondamentalement différents que nous qualifions de "réversibles" et "d'irréversibles".

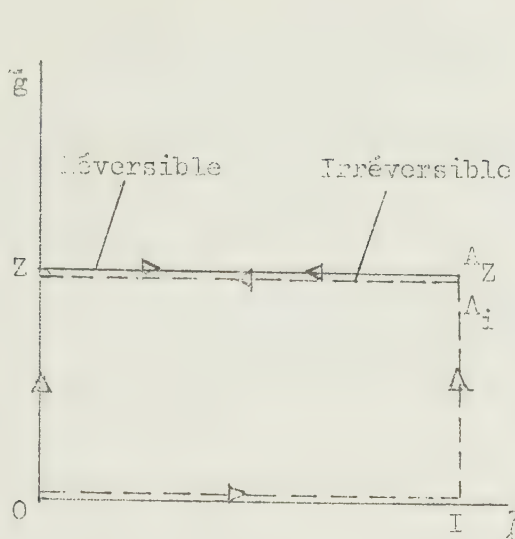


Schéma 1

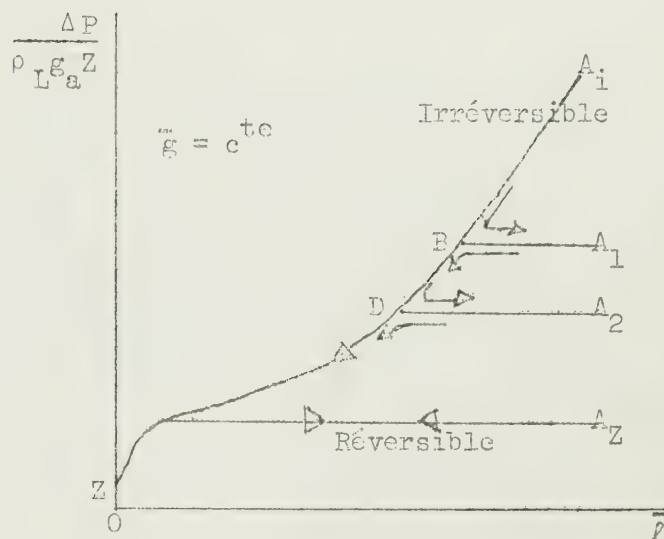


Schéma 2

a) Fonctionnements "réversibles".

On part d'un état mouillé, on introduit un débit de gaz (point Z) qui est maintenu constant au cours de l'expérience ; on introduit ensuite un débit de liquide qu'on augmente progressivement (jusqu'au point A_Z).

On observe que le trajet $Z \rightleftharpoons A_Z$ est réversible : on peut revenir de A_Z en Z, la chute de pression de l'air et la retenue liquide reprennent les mêmes valeurs pour chaque couple de valeurs de $\bar{l}$ et $\bar{g}$. A partir d'une valeur déterminée de $\bar{l}$, les courbes $\Delta P / \rho_L g_a Z = f(\bar{l})_{\bar{g}}$ sont des horizontales (voir schéma 2).

b) Fonctionnements irréversibles.

Si, au contraire, on établit d'abord le débit liquide (point I) et ensuite le débit de gaz (point A_i), on obtient un système différent du point A_Z : la chute de pression est nettement plus grande qu'en A_Z (voir schéma 2) ; la retenue liquide est plus grande.

Si on diminue le débit d'eau, on décrit irréversiblement le trajet $\overrightarrow{A_1 Z}$ qui est différent de $\overrightarrow{A_2 Z}$; en effet, les courbes de chute de pression de l'air sont décroissantes et situées au-dessus des paliers.

Mais si on s'arrête en un point B et si on réaugmente le débit $\bar{l}$ jusqu'à sa valeur en A la chute de pression de l'air reste constante (point A_1). De même, à partir de D on atteint le point A_2 .

Les trajets $\overleftrightarrow{B A_1}$, $\overleftrightarrow{D A_2}$... etc. sont réversibles.

De l'existence de ces deux types de fonctionnement, il résulte que l'état d'équilibre où se place le système pour chaque couple de valeurs des débits d'air $\bar{g}$ et d'eau $\bar{l}$ dépend du chemin suivi, en conséquence il fut nécessaire d'effectuer pour chaque cas deux séries d'expériences :

- au cours de la première série d'expériences, on mesure la chute de pression de l'air, le système évoluant de façon continue.

- au cours de la seconde série d'expériences, on place le système dans les mêmes états que ceux où il s'est trouvé précédemment, en contrôlant la chute de pression de l'air, et on effectue les mesures de retenue liquide.

On note enfin que les expériences correspondant aux fonctionnements réversibles sont effectuées à débit d'eau $\bar{l}$ croissant et celles correspondant aux fonctionnements irréversibles à débit d'eau $\bar{l}$ décroissant.

I - 322 Présentation des résultats complets.

I - 322 . 1 Retenues liquides de garnissage β .

La méthode expérimentale de détermination de la retenue liquide de garnissage β est reportée en annexe A-I. Les résultats sont portés sur les graphiques I.3221.1 et I.3221.2 ; ils mettent en évidence l'importance des débits limites $\bar{l} = 3,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ et $\bar{g} = 44 \text{ cm}^3/\text{s}$, en effet :

- dans le cas du fonctionnement irréversible ($\bar{l}$ décroissant), graphique I.3221.1, pour les valeurs de $\bar{l}$ supérieures à $3,5 \text{ cm}^3/\text{s}$, la retenue liquide β croît lorsque le débit d'air $\bar{g}$ croît ; pour les valeurs de $\bar{l}$ inférieures à $3,5 \text{ cm}^3/\text{s}$, si $\bar{g}$ est supérieur à $44 \text{ cm}^3/\text{s}$ β diminue lorsque $\bar{g}$ croît et si $\bar{g}$ est inférieur à $44 \text{ cm}^3/\text{s}$ β diminue lorsque $\bar{g}$ décroît.

- dans le cas du fonctionnement réversible ($\bar{l}$ croissant), pour les valeurs de $\bar{l}$ supérieures à $3,5 \text{ cm}^3/\text{s}$, β décroît lorsque $\bar{g}$ croît ; pour les valeurs de $\bar{l}$ inférieures à $3,5 \text{ cm}^3/\text{s}$, si $\bar{g}$ est supérieur à $44 \text{ cm}^3/\text{s}$ β décroît lorsque $\bar{g}$ croît et si $\bar{g}$ est inférieur à $44 \text{ cm}^3/\text{s}$ β décroît lorsque $\bar{g}$ décroît.

On remarque de plus que le réseau de courbes obtenu dans le cas du fonctionnement irréversible se place au-dessus du réseau de courbes correspondant au fonctionnement réversible, les courbes obtenues pour les faibles débits d'air $\bar{g}$ dans les deux cas étant confondues.

I - 322 . 2 Chutes de pression de l'air.

La technique expérimentale de mesure de la chute de pres-

retenue liquide de garnissage

β

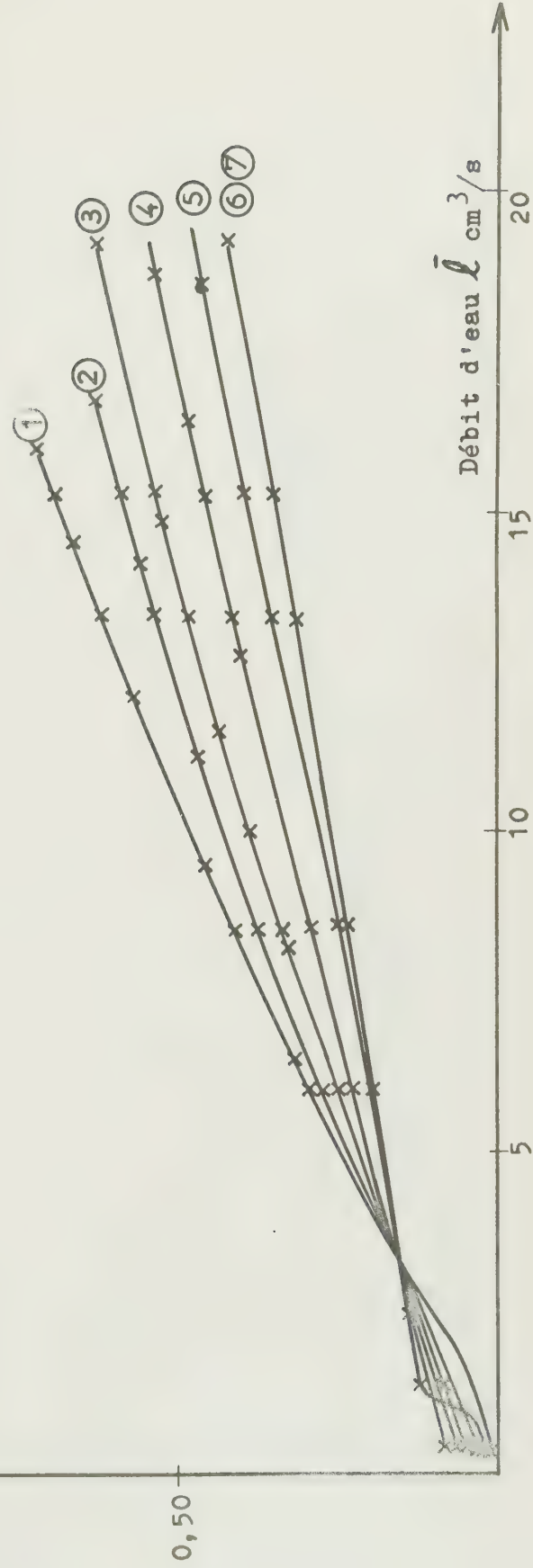
1

0,50

$\bar{g}_1 = 215 \text{ cm}^3/\text{s}$
 $\bar{g}_2 = 186 \text{ cm}^3/\text{s}$
 $\bar{g}_3 = 134 \text{ "}$
 $\bar{g}_4 = 86 \text{ "}$
 $\bar{g}_5 = 44 \text{ "}$
 $\bar{g}_6 = 25 \text{ "}$
 $\bar{g}_7 = 18 \text{ "}$

RETENUE LIQUIDE DE GARNISSAGE β EN FONCTION
DU DÉBIT D'EAU $\bar{L}$ A DÉBIT D'AIR $\bar{g}$ CONSTANT

FONCTIONNEMENT IRREVERSIBLE

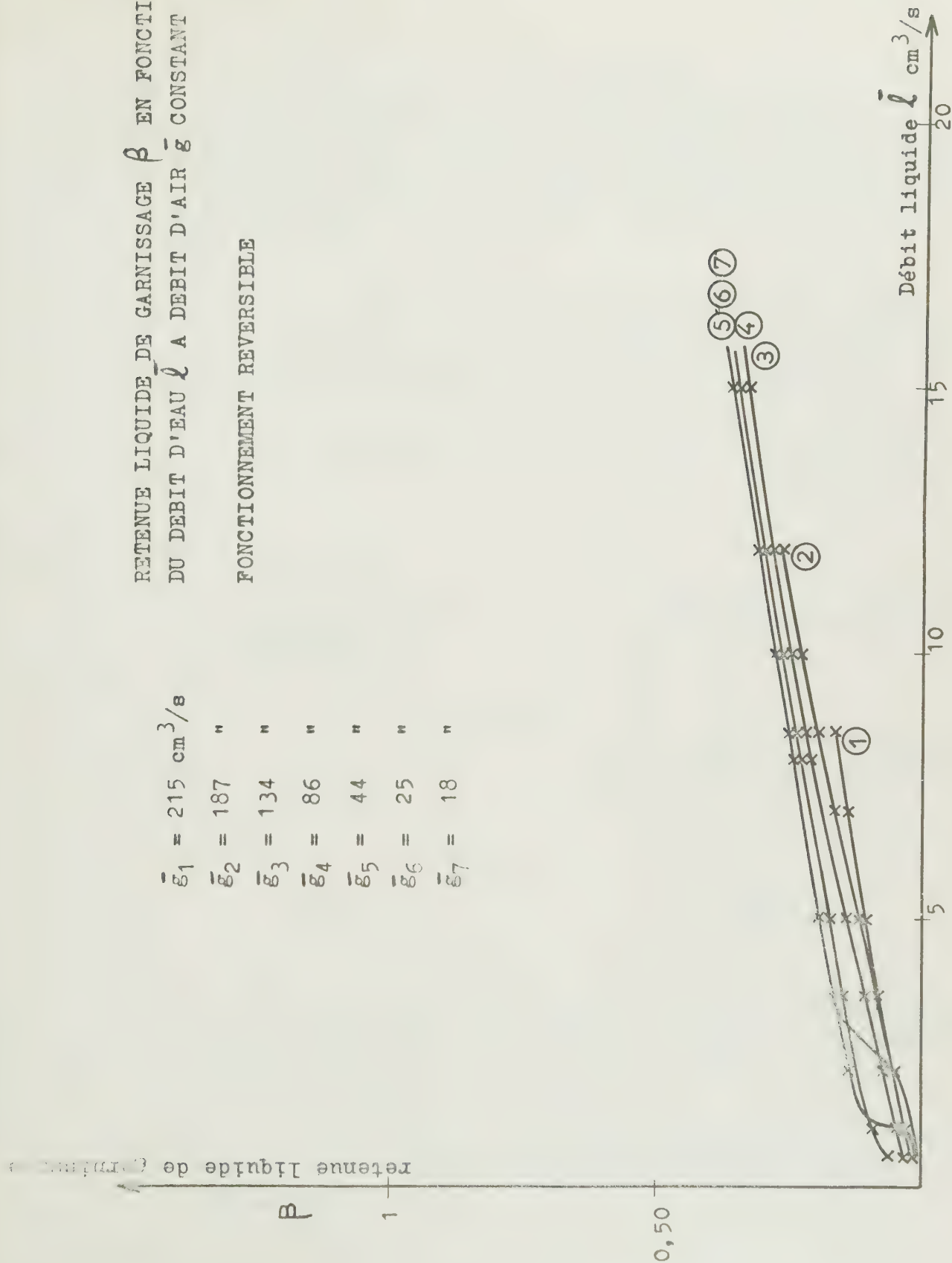


Graphique I.3221.1

RETENUE LIQUIDE DE GARNISSAGE β EN FONCTION
DU DÉBIT D'EAU $\bar{Q}$ A DÉBIT D'AIR $\bar{g}$ CONSTANT

FONCTIONNEMENT REVERSIBLE

$\bar{g}_1$	=	215	cm ³ /s
$\bar{g}_2$	=	187	"
$\bar{g}_3$	=	134	"
$\bar{g}_4$	=	86	"
$\bar{g}_5$	=	44	"
$\bar{g}_6$	=	25	"
$\bar{g}_7$	=	18	"



Graphique I.3221.2

sion de l'air ne présente aucune difficulté ; toutefois l'état d'équilibre du système dépendant très sensiblement du chemin suivi pour atteindre cet état, il est nécessaire de toujours préciser l'opération qui a précédé la détermination des conditions de fonctionnement de l'appareil.

Les résultats obtenus dans les deux modes de fonctionnement considérés précédemment sont portés sur les graphiques I.3222.1 et I.3222.2 ; ils présentent les particularités suivantes :

- dans les deux cas on obtient deux types de courbes, selon que $\bar{g}$ est supérieur ou inférieur à $44 \text{ cm}^3/\text{s}$ (voir schémas 1 et 2).

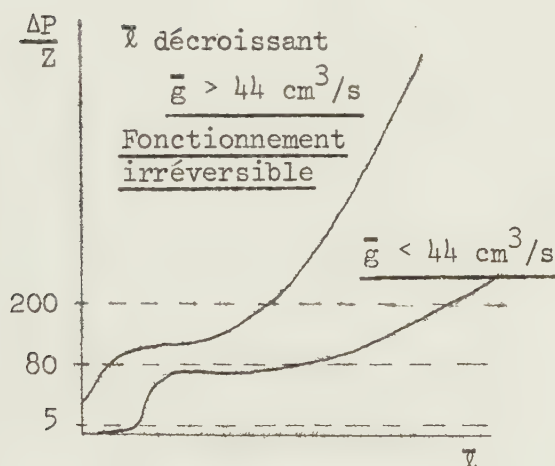


schéma 1

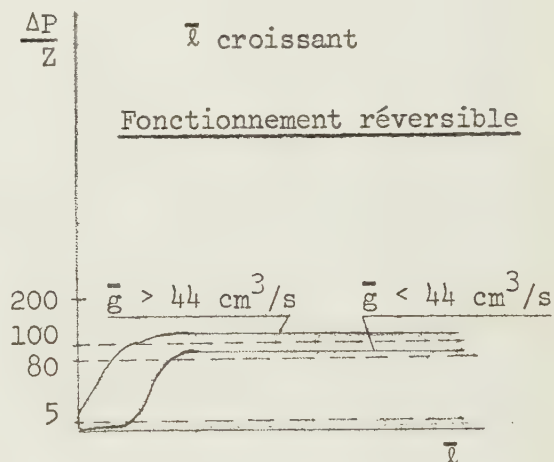
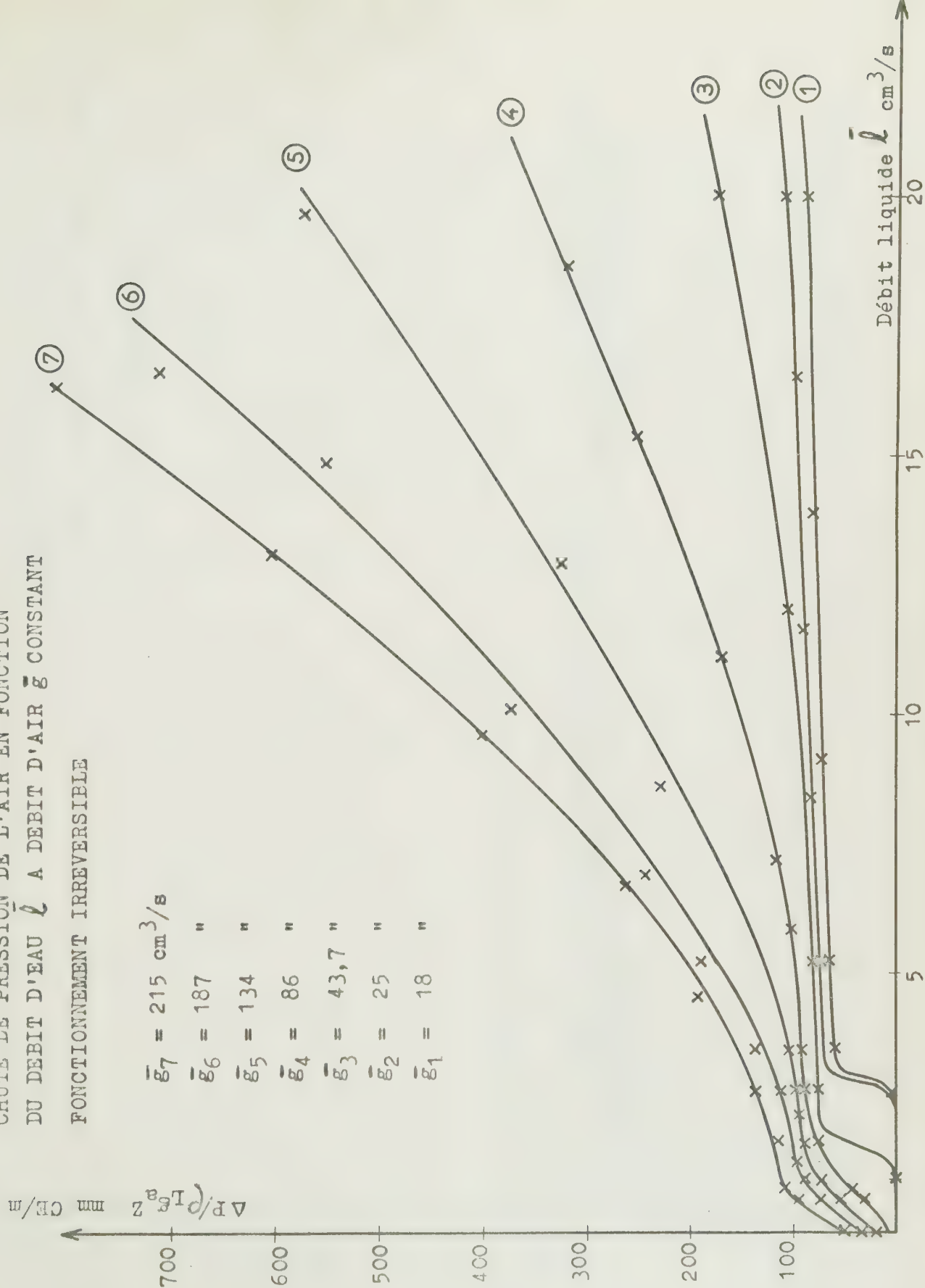


schéma 2

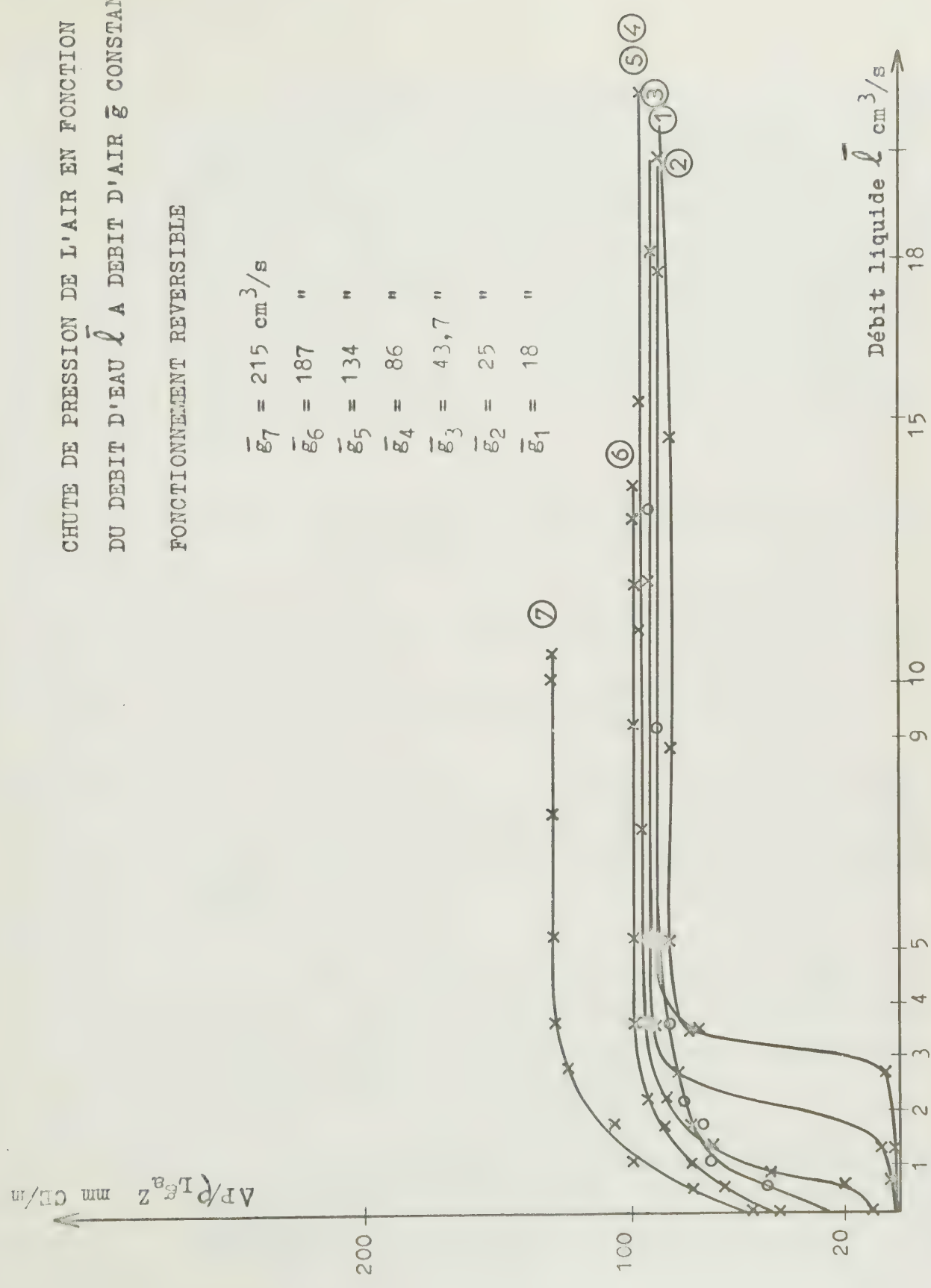
- pour un même débit d'air $\bar{g}$ les courbes correspondant au fonctionnement irréversible se situent au-dessus des courbes correspondant au fonctionnement réversible.

- les valeurs de $\Delta P/\rho_L g_a Z$ correspondant aux paliers des courbes (schéma 2), sont principalement comprises entre 80 et 100 mm CE/m.

CHUTE DE PRESSION DE L'AIR EN FONCTION
DU DEBIT D'EAU $\bar{Q}$ A DEBIT D'AIR $\bar{g}$ CONSTANT
FONCTIONNEMENT IRREVERSIBLE



CHUTE DE PRESSION DE L'AIR EN FONCTION
DU DEBIT D'EAU $\bar{Q}$ A DEBIT D'AIR $\bar{Q}$ CONSTANT
FONCTIONNEMENT REVERSIBLE



Graphique I.3222.2

- l'allure des courbes obtenues dans le cas du fonctionnement irréversible permet de distinguer les quatre domaines suivants : le domaine $\Delta P/\rho_L g_a Z$ supérieur à 200 mm CE/m, où la chute de pression de l'air diminue rapidement et de façon irréversible ; le domaine $\Delta P/\rho_L g_a Z$ compris entre 200 et 80 mm CE/m où les courbes présentent un point d'inflexion ; le domaine $\Delta P/\rho_L g_a Z$ compris entre 80 et 5 mm CE/m, où les courbes homologues obtenues suivant les deux types de fonctionnement ont une partie commune ; et enfin le domaine $\Delta P/\rho_L g_a Z$ inférieur à 5 mm CE/m qui n'existe que pour $\bar{g}$ inférieur à 44 cm³/s.

I - 323 Interprétation des évolutions irréversibles et réversibles.

I - 323 . 1 Exemple simplifié. Principe du mécanisme.

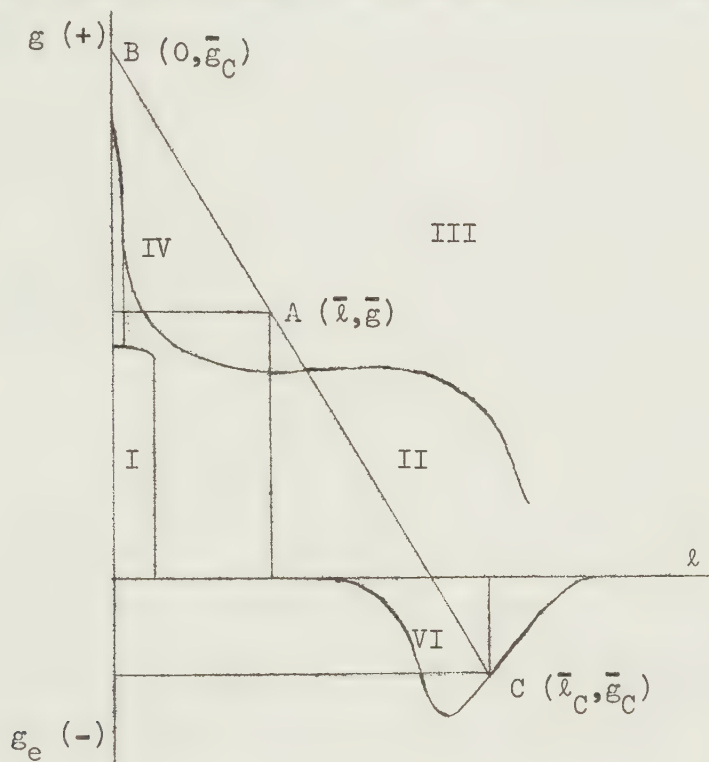
Supposons que les 126 tubes du faisceau se partagent en deux catégories : des tube-gaz et des tube-liquide.

Quand on décrit un trajet réversible (palier horizontal des courbes $\Delta P/Z = f(\bar{l} - \frac{1}{\bar{g}})$), les nombres de tube-gaz et de tube-liquide restent constants; seul le débit d'eau dans les tube-liquide augmente.

Quand on décrit un trajet irréversible ($\Delta P/\rho_L g_a Z$ diminue quand on diminue $\bar{l}$), des tube-liquide se débouchent, le nombre de tube-gaz augmente et puisque $\bar{g}$ est constant le débit g dans chaque tube-gaz diminue, donc $\Delta P/\rho_L g_a Z$ diminue.

Sur le diagramme (l, g) obtenu pour un tube seul, représenté ci-dessous, on porte le point A ($\bar{l}, \bar{g}$) représentant les conditions moyennes de fonctionnement du faisceau, le point B (0, $\bar{g}_p$)

représentant l'état de fonctionnement des tube-gaz et le point $C (\bar{l}_C, \bar{g}_C)$ celui des tube-liquide. Le point A peut être considéré comme le point d'addition des points B et C ; il est théoriquement



possible d'utiliser cette représentation graphique pour résoudre le système ; toutefois cette méthode de résolution graphique qui sera utilisée ultérieurement présente ici des difficultés pratiques, en conséquence le problème sera résolu algébriquement.

I - 323 . 2 Traitement quantitatif complet.

Le but que nous nous sommes fixés est de relier l'évolution du système à la variation des nombres de tubes ayant un fonctionnement identique et ainsi de rendre compte des propriétés hydrodynamiques du faisceau de tubes à partir de celles d'un seul tube.

Soient respectivement N_S , N_{PM} , N_M les nombres de tube-gaz secs surmontés d'une couche d'eau, de tube-gaz partiellement mouillés et de tube-gaz mouillés, et N_L , N_B , N_F les nombres de tube-liquide, de tubes avec "bullage" et de tubes avec film d'eau et contre-courant central d'air.

On appelle g_S , g_{PM} , g_M , g_B , g_F et g_e les débits d'air, l_B , l_F , l_L les débits d'eau s'écoulant dans les tubes des différentes catégories ; ΔP_S , ΔP_{PM} , ΔP_M , ΔP_B , ΔP_F , ΔP_L sont les chutes de pression de l'air, β_{PM} , β_M , β_B , β_F , β_L les retenues liquides.

On pose :

$$\bar{g} = \frac{G}{N} \quad \bar{g}_S = \frac{G_S}{N_S} \quad \dots \quad \bar{g}_e = \frac{G_e}{N_L}$$

On a les relations évidentes suivantes :

- entre les nombres de tubes de chaque catégorie :

$$(1) \quad N_S + N_{PM} + N_M + N_B + N_F + N_L = N$$

- entre les débits d'air :

$$(2) \quad N_S \bar{g}_S + N_{PM} \bar{g}_{PM} + N_M \bar{g}_M + N_B \bar{g}_B + N_F \bar{g}_F - N_L \bar{g}_e = G$$

- entre les débits d'eau :

$$(3) \quad N_L \bar{l}_L + N_B \bar{l}_B + N_F \bar{l}_F = L$$

Les tubes du faisceau étant montés en parallèle, l'air subit dans chaque tube la même chute de pression qui est la chute de pression globale ΔP mesurée, subie par le débit d'air G dans le faisceau ; il en résulte les relations suivantes :

$$(4) \text{ à } (8) \quad \Delta P_{\text{mesurée}} = \Delta P_S = \Delta P_{PM} = \dots = \Delta P_L$$

De plus, la retenue liquide de garnissage, exprimée en pourcentage de volume occupé par le liquide s'écrit :

$$(9) \quad \beta = \frac{N_{PM} \beta_{PM} + \dots + N_L \beta_L}{N}$$

Les expériences effectuées avec un seul tube nous ont permis de déterminer les domaines d'existence des différents modes d'écoulement des deux phases et d'obtenir les courbes de variations de la chute de pression de l'air pour chacun de ces modes d'écoulement (graphique I.134) ; on a donc les relations :

$$(10) \quad \Delta P_S = f_S (g_S)$$

$$(11) \quad \Delta P_{PM} \pm \delta (\Delta P_{PM}) = f_{PM} (g_{PM})$$

$$(12) \quad \Delta P_M \pm \delta (\Delta P_M) = f_M (g_M)$$

$$(13) \quad \Delta P_B \pm \delta (\Delta P_B) = f_B (g_B)$$

$$(14) \quad \Delta P_F = f_F (g_F)$$

$$(15) \quad \Delta P_L = f_L (g_e)$$

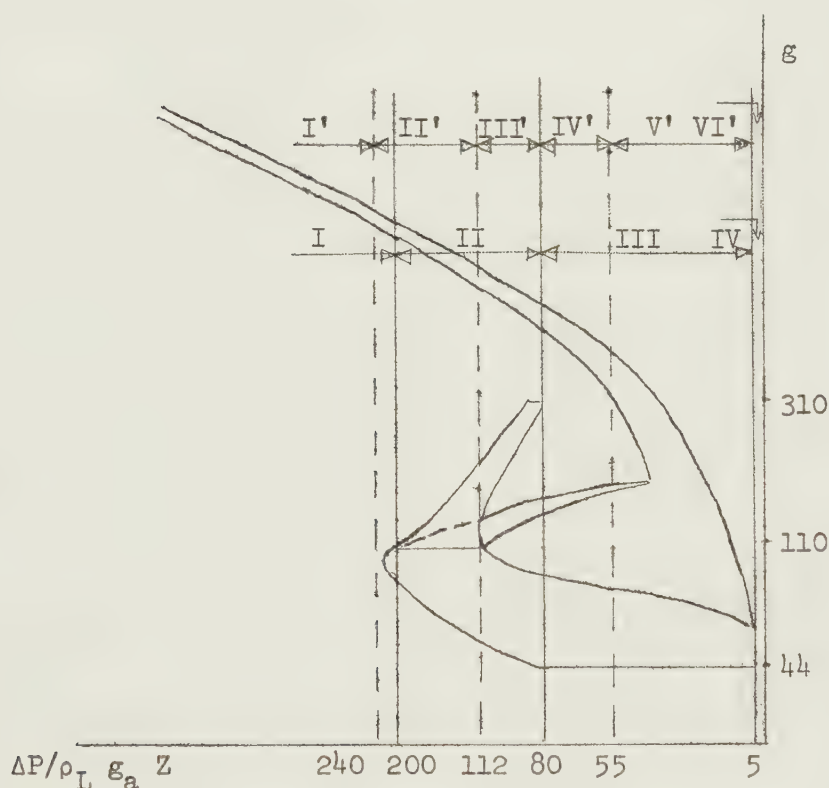
Les grandeurs N , G , L , $\Delta P_{\text{mesurée}}$ étant connues, $g_S \dots g_e$ étant déterminées à l'aide des relations (10) à (15), on peut déterminer $N_S \dots N_L$ à l'aide des relations (1), (2) et (4) à (8).

A l'aide de la relation (9), le calcul de la retenue liquide d'un tube liquide effectué au paragraphe I.133.2 permet une vérification approchée des résultats obtenus à partir des mesures de chute de pression de l'air.

On contrôle de plus, à l'aide de la relation (3) que les conditions traduites par les limites des domaines d'existence des différents modes d'écoulement sont satisfaites.

I - 323 . 3 Utilisation des diagrammes établis pour un seul tube et pour deux tubes pour l'interprétation des fonctionnements irréversibles.

Le schéma relatif aux chutes de pression de l'air dans un tube reproduit ci-dessous permet de déterminer pour chaque valeur de $\Delta P / \rho_L g_a Z$ mesurée les différentes catégories de tube-gaz qui peuvent fonctionner en parallèle des tube-liquide.



D'après ce schéma, le système peut comprendre :

- dans le domaine I' ($\Delta P / \rho_L g_a Z > 240$ mm CE/m) des tube-liquide et des tube-gaz secs surmontés d'une couche d'eau.

- dans le domaine II' ($112 \leq \Delta P / \rho_L g_a Z \leq 240$ mm CE/m) des tube-liquide, des tube-gaz secs, des tube-gaz mouillés et des tubes avec "bullage".

- dans le domaine III' ($80 < \Delta P / \rho_L g_a Z < 112$ mm CE/m) des tube-liquide, des tube-gaz secs, des tube-gaz mouillés, des tube-gaz partiellement mouillés, des tubes avec "bullage".

- dans le domaine IV' ($55 \leq \Delta P / \rho_L g_a Z \leq 80$ mm CE/m) des tube-liquide, des tube-gaz secs, des tube-gaz partiellement mouillés et des tubes avec "bullage".

- dans le domaine V' ($5 < \Delta P / \rho_L g_a Z < 55$ mm CE/m) des tube-liquide, des tube-gaz partiellement mouillés, des tubes avec "bullage".

- dans le domaine VI' ($\Delta P / \rho_L g_a Z \leq 5$ mm CE/m) des tube-liquide et des tubes avec film d'eau et contre-courant central d'air.

L'existence et les limites de ces domaines sont modifiées à l'aide des deux remarques suivantes :

1) un tube-liquide qui se débouche ne peut devenir tube-gaz partiellement mouillé.

2) les expériences sur deux tubes ont montré que tant que le débit d'air est décomposable en la somme de deux débits g_M et g_S tels que l'air subisse la même chute de pression dans les deux tubes, la transformation du système est telle que cette décomposition ait lieu ; dans le cas de 2 tubes cette transformation apparaît pour $\Delta P / \rho_L g_a Z < 200$ mm CE/m ; on supposera que dans le cas du faisceau, dans le domaine $80 < \Delta P / \rho_L g_a Z < 200$ mm CE/m, les tube-liquide qui se débouchent deviennent des tube-gaz mouillés.

Finalement, l'étude de l'évolution du système dans le cas des fonctionnements irréversibles comprendra quatre parties :

- étude du domaine I ($\Delta P/\rho_L g_a Z \geq 200$ mm CE/m) où le système comprend des tube-liquide et des tube-gaz secs.

- étude du domaine II ($80 < \Delta P/\rho_L g_a Z < 200$ mm CE/m) où le système comprend des tube-liquide, des tube-gaz secs et des tube-gaz mouillés.

- étude du domaine III ($5 < \Delta P/\rho_L g_a Z \leq 80$ mm CE/m) où le système comprend des tube-liquide, des tube-gaz secs ou partiellement mouillés et des tubes avec "bullage".

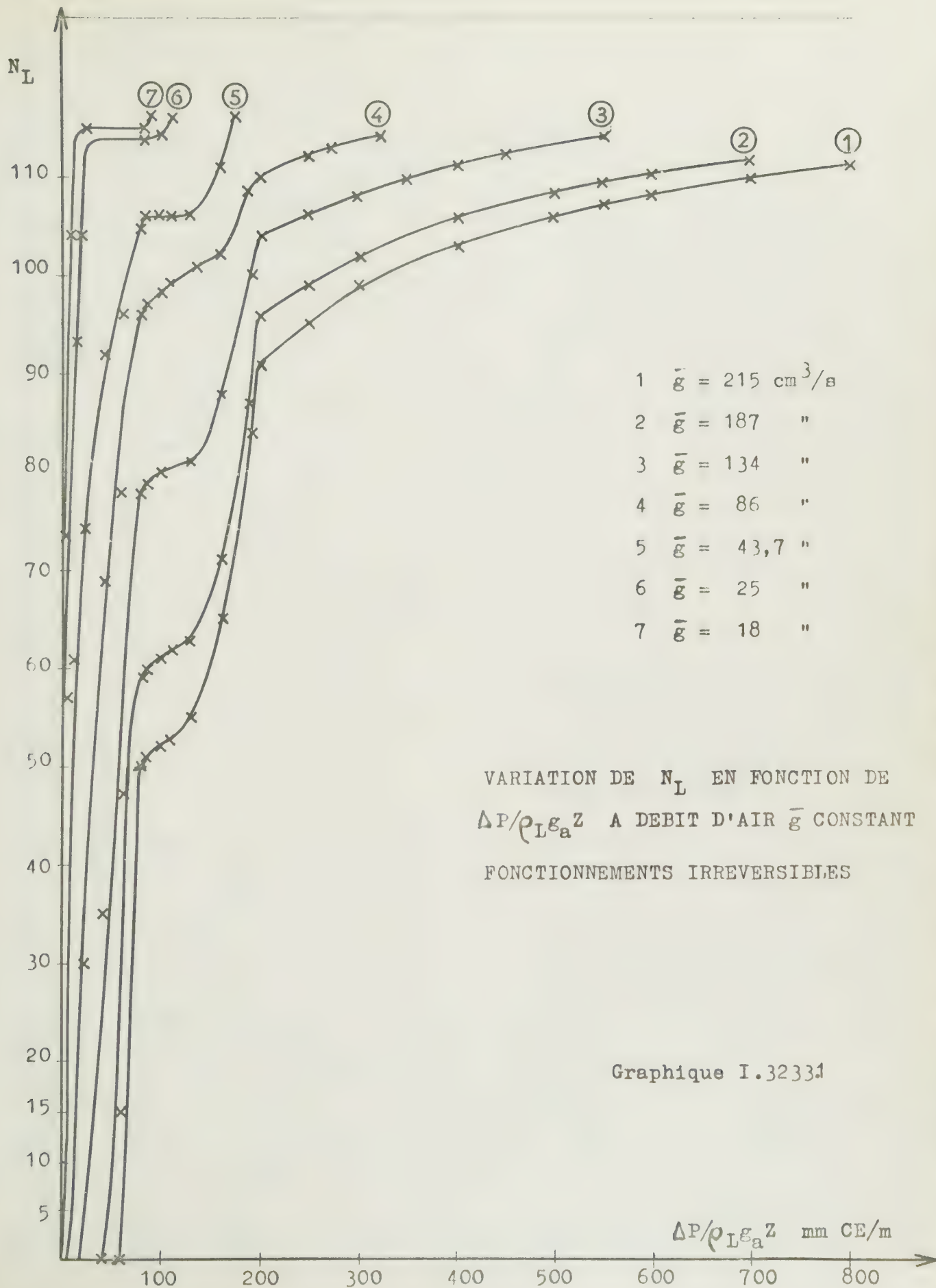
- étude du domaine IV ($\Delta P/\rho_L g_a Z < 5$ mm CE/m) où le système comprend des tube-liquide et des tubes avec film d'eau et contre-courant central de gaz, ou uniquement des tubes de cette dernière catégorie.

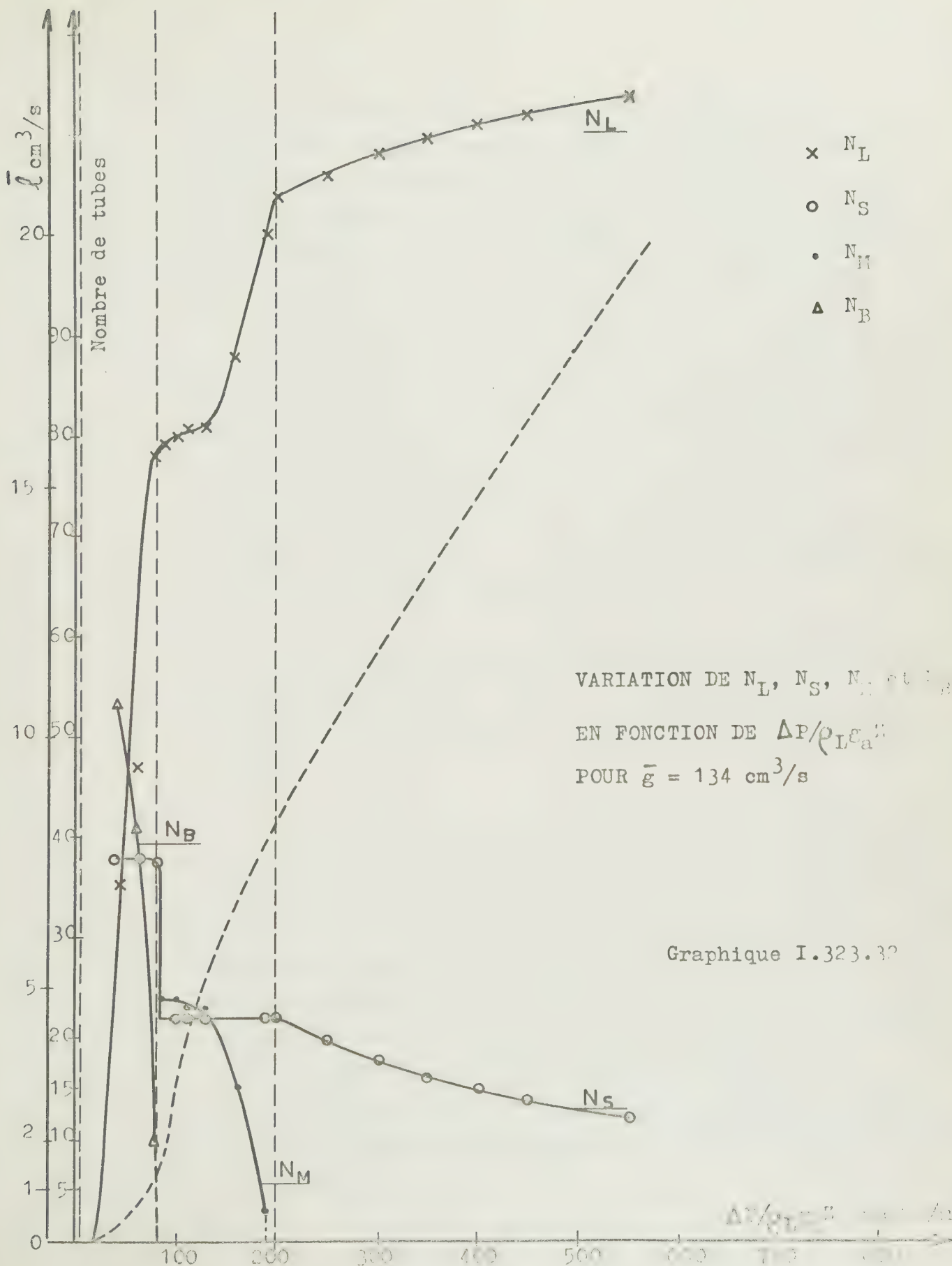
Le détail des calculs effectués pour chaque domaine et les tableaux des résultats obtenus sont portés en annexe A-II. On a représenté sur le graphique I.323.31 les variations de N_L en fonction de $\Delta P/\rho_L g_a Z$ pour tous les débits d'air étudiés, et sur le graphique I.323.32 les variations de N_L , N_S , N_B et N_M en fonction de $\Delta P/\rho_L g_a Z$ pour $\bar{g}$ égal à $134 \text{ cm}^3/\text{s}$; de plus, sur ce dernier graphique est représentée en pointillés la variation de $\Delta P/\rho_L g_a Z$ en fonction de $\bar{x}$ ainsi que les limites des domaines considérés ci-dessus.

On peut faire les remarques suivantes :

1) La valeur initiale de N_L (voir graphique I.323.31) est pratiquement la même pour tous les débits d'air étudiés.

2) Dans le domaine I ($\Delta P/\rho_L g_a Z \geq 200$ mm CE/m) une faible variation de N_L se traduit par une forte variation de $\Delta P/\rho_L g_a Z$: par exemple, pour $\bar{g} = 134 \text{ cm}^3/\text{s}$ (graphique I.323.32), une diminution de N_L inférieure à 10 % se traduit par une variation de $\Delta P/\rho_L g_a Z$ supérieure à 60 %.





3) A la limite entre les domaines I et II ($\Delta P/\rho_L g_a Z = 200 \text{ mm CE/m}$), l'apparition d'une nouvelle catégorie de tube-gaz se traduit par un changement brusque de la loi de variation de N_L ; dans tout le domaine II ($80 < \Delta P/\rho_L g_a Z < 200 \text{ mm CE/m}$) N_S reste constant alors que N_M croît rapidement ; il en résulte pour la courbe $\Delta P/\rho_L g_a Z = f(\bar{\ell})$ l'existence d'un point d'inflexion.

4) A la limite entre les domaines II et III ($\Delta P/\rho_L g_a Z = 80 \text{ mm CE/m}$), il se produit d'une part le passage à l'état de tube-gaz avec "bullage" d'un tube-liquide et, simultanément, la transformation des tube-gaz mouillés dont une partie deviennent tube-gaz secs et l'autre tube-gaz avec "bullage" ; ainsi N_M devient égal à zéro et N_S croît brutalement. Dans tout le domaine III ($5 < \Delta P/\rho_L g_a Z \leq 80 \text{ mm CE/m}$), N_S reste constant alors que N_L décroît et que N_B croît rapidement, un grand nombre de tube-liquide se débouchant pour devenir tubes avec "bullage".

5) On vérifie que le domaine IV ($\Delta P/\rho_L g_a Z \leq 5 \text{ mm CE/m}$) n'existe que pour $\bar{g}$ inférieur à $44 \text{ cm}^3/\text{s}$. Le système évolue alors vers un état où tous les tubes sont des tubes avec film d'eau et contre-courant central d'air ; cet état est atteint pour $\bar{\ell}$ égal à $1 \text{ cm}^3/\text{s}$.

6) Au paragraphe I.323.1, on a admis que la diminution de $\Delta P/\rho_L g_a Z$ le long d'un trajet irréversible était due, $\bar{g}$ restant constant, au débouchage des tube-liquide ; en fait, elle dépend d'un second facteur qui est la variation du débit d'air entraîné g_e dans chaque tube-liquide en fonction de λ . Les résultats montrent que pour les faibles valeurs de $\bar{g}$ étudiées, dans les domaines II et III, ce second facteur détermine les variations de $\Delta P/\rho_L g_a Z$ en fonction de $\bar{\ell}$, le nombre de tube-liquide restant constant.

7) On note enfin que la vérification à l'aide des mesures de β de l'interprétation des propriétés des fonctionnements irréver-

sibles à partir des mesures de $\Delta P/\rho_L g_a Z$ donne des résultats satisfaisants.

I - 323 . 4 Etude de l'évolution des systèmes réversibles.

De même que précédemment la détermination, pour chaque valeur de $\Delta P/\rho_L g_a Z$, des différentes catégories de tube-gaz pouvant fonctionner en parallèle des tube-liquide est faite à partir du schéma relatif aux chutes de pression de l'air dans un tube seul.

L'évolution des systèmes réversibles comprend deux phases :

- 1) La phase où $\Delta P/\rho_L g_a Z$ croît en fonction de $\bar{l}$ croissant.
- 2) La phase où $\Delta P/\rho_L g_a Z$ est constante lorsque $\bar{l}$ croît (palier des courbes $\Delta P/\rho_L g_a Z = f(\bar{l}) \frac{1}{g}$).

Les détails des calculs et les tableaux de résultats sont portés en annexe A-III.

I - 323 . 41 Interprétation des paliers des courbes

$$\Delta P/\rho_L g_a Z = f(\bar{l}) \frac{1}{g} \quad (\bar{l} \text{ supérieur à } 3,5 \text{ cm}^3/\text{s}).$$

Comme on l'a vu au paragraphe I.323.1, le long d'un palier horizontal des courbes $\Delta P/\rho_L g_a Z = f(\bar{l}) \frac{1}{g}$ correspondant au fonctionnement réversible du faisceau, les nombres de tube-gaz et de tube-liquide restent constants ; ce résultat est vérifié à l'aide des mesures de β .

D'après le schéma des chutes de pression de l'air dans un seul tube (voir paragraphe I.323.3), le système peut comprendre des

tube-liquide, des tube-gaz secs, des tubes partiellement mouillés, des tubes mouillés et des tubes avec "bullage" ; or le palier des courbes ne peut être atteint que lorsque dans chaque tube-gaz s'écoule un débit d'air $\bar{g}$ supérieur à $110 \text{ cm}^3/\text{s}$, on a donc N_B égal à zéro ; de plus, étant donné le mode opératoire utilisé ici, il ne peut exister de tube-gaz partiellement mouillé, on a donc N_{PM} égal à zéro.

La résolution du système nécessite donc le calcul de N_L , N_S et N_M . On détermine N_L à partir des mesures de β à l'aide de la relation :

$$\beta = \frac{N_L \beta_L + N_M \beta_M}{N}$$

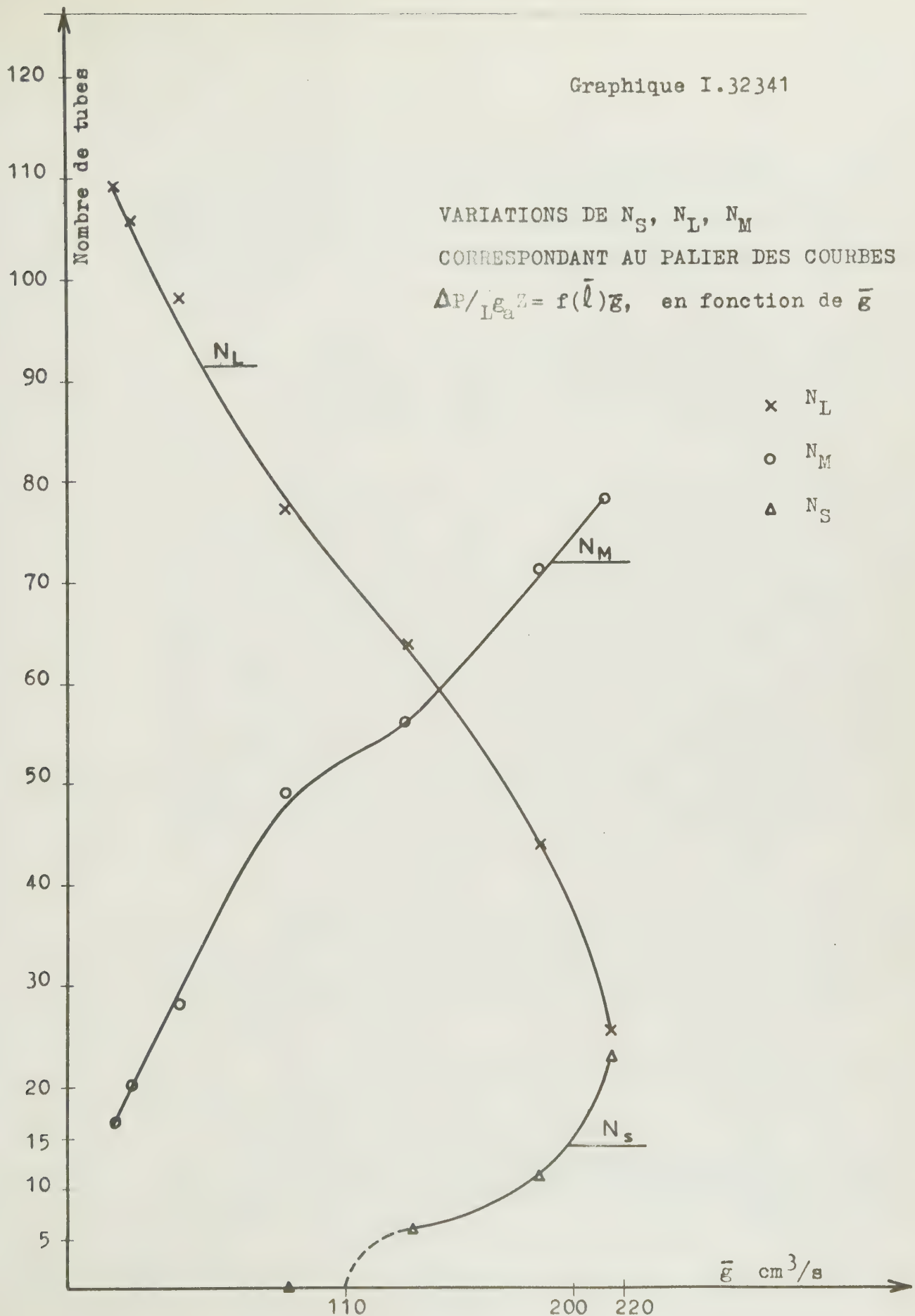
où on néglige le terme $N_M \beta_M$.

N_L étant connu, N_M et N_S sont alors déterminés en résolvant le système :

$$\begin{aligned} N_L + N_M + N_S &= N \\ N_M \bar{g}_M + N_S \bar{g}_S - N_L \bar{g}_e &= G \\ N_L \bar{g}_L &= N \bar{g} \end{aligned}$$

Sur le graphique I.323.41 sont portées les variations de N_L , N_S et N_M en fonction de $\bar{g}$. On peut faire les remarques suivantes :

- il n'existe des tube-gaz secs que pour $\bar{g}$ supérieur à $110 \text{ cm}^3/\text{s}$.
- le pourcentage de tubes qui se trouvent à l'état de tube-liquide varie de 20 % pour le débit d'air maximal à 86 % pour le débit d'air minimal étudié.
- les courbes représentant les variations de N_L et de N_M en fonction de $\bar{g}$ présentent un point d'inflexion pour $\bar{g}$ égal à $110 \text{ cm}^3/\text{s}$.



- les paliers des courbes $\Delta P / \rho_L g_a Z = f(\bar{l}) \frac{\bar{g}}{g}$ n'étant atteint que lorsque dans chaque tube-gaz s'écoule un débit d'air $\bar{g}$ au moins égal à $110 \text{ cm}^3/\text{s}$, il est normal que la valeur de $\Delta P / \rho_L g_a Z$ correspondant aux paliers soit pratiquement la même quel que soit $\bar{g}$.

I - 323 . 42 Evolution du système dans le domaine où $\Delta P / \rho_L g_a Z$ croît en fonction de $\bar{l}$ croissant ($\bar{l}$ inférieur à $3,5 \text{ cm}^3/\text{s}$).

Rappelons qu'initialement le faisceau de tubes est mouillé et égoutté ; dans chaque tube, il existe une quantité d'eau déterminée et différente pour chaque tube ; cette quantité d'eau caractérise un état de mouillage qui ne peut être bien défini, en particulier la variation de la chute de pression de l'air en fonction du débit d'air pour chaque état de mouillage ne peut être déterminée ; en conséquence, la détermination des nombres de tubes des différentes catégories n'est pas possible, c'est pourquoi nous nous bornerons à énoncer, à l'aide des résultats obtenus avec un système de deux tubes, les différentes transformations qui déterminent l'évolution du système avant d'atteindre le palier des courbes $\Delta P / \rho_L g_a Z = f(\bar{l}) \frac{\bar{g}}{g}$.

Quand on décrit la partie croissante d'un trajet réversible, des tube-gaz se bouchent, le nombre des tube-gaz diminue et puisque $\bar{g}$ reste constant, le débit d'air $\bar{g}$ dans chaque tube-gaz augmente, donc $\Delta P / \rho_L g_a Z$ augmente.

On distinguera deux cas selon que $\bar{g}$ est supérieur ou inférieur à $44 \text{ cm}^3/\text{s}$.

1) Pour les valeurs de $\bar{g}$ supérieures à $44 \text{ cm}^3/\text{s}$, les seuls tubes qui peuvent se boucher sont les tubes avec "bullage", on peut

donc avoir les deux transformations suivantes :

$$\begin{aligned} (N_B \text{ tubes avec "bullage"}) &\longrightarrow (1 \text{ tube-liquide} + (N_B - 1) \text{ tubes} \\ &\quad \text{avec "bullage"}) \\ (N_B \text{ tubes avec "bullage"}) &\longrightarrow (1 \text{ tube-liquide} + 1 \text{ tube-gaz mouillé} \\ &\quad + (N_B - 2) \text{ tubes sans "bullage"}). \end{aligned}$$

Remarquons que pour les débits d'air $\bar{g}$ supérieurs à $110 \text{ cm}^3/\text{s}$, si la répartition initiale des débits d'air dans les 126 tubes du faisceau (qui dépend de la répartition des états de mouillage des tubes avant l'introduction de l'air) était uniforme, le liquide ne pourrait s'écouler à travers le faisceau, les expériences seraient alors impossibles.

2) Pour les valeurs de $\bar{g}$ inférieures à $44 \text{ cm}^3/\text{s}$, le système ne comprend initialement que des tubes avec film d'eau et contre-courant central d'air ($\Delta P/\rho_L g_a Z$ est inférieure à 5 mm CE/m) ; dans ce cas l'évolution du système comprend deux phases :

- tant que $\Delta P/\rho_L g_a Z$ reste inférieure à 5 mm CE/m , on a les transformations du type :

$$(N_F \text{ tube-gaz avec film d'eau}) \longrightarrow (1 \text{ tube-liquide} + (N_F - 1) \text{ tube-gaz avec film d'eau})$$

- lorsque $\Delta P/\rho_L g_a Z$ devient supérieur à 5 mm CE/m , on a :

$$(N_F \text{ tube-gaz avec film d'eau}) \longrightarrow (N_L \text{ tube-liquide} + N_B \text{ tubes avec "bullage"}).$$

Les transformations qui se produisent ensuite jusqu'à ce que le palier soit atteint sont les mêmes que celles obtenues pour $\bar{g}$ supérieur à $44 \text{ cm}^3/\text{s}$.

I - 324 Conclusions.

I - 324 . 1 Retour sur l'interprétation des transformations irréversibles.

On a montré que l'évolution irréversible du système fonctionnant à débit d'air $\bar{g}$ constant et à débit d'eau $\bar{l}$ décroissant, dans le domaine des chutes de pression de l'air supérieures à 80 mm CE/m, était due aux deux types de transformations suivants :

$$\begin{aligned} (N_L \text{ tube-liquide} + N_S \text{ tube-gaz secs}) &\longrightarrow ((N_L - 1) \text{ tube-liquide} + \\ &\quad (N_S + 1) \text{ tube-gaz secs}) \\ (N_L \text{ tube-liquide} + N_M \text{ tube-gaz mouillés}) &\longrightarrow ((N_L - 1) \text{ tube-liquide} \\ &\quad + (N_M + 1) \text{ tube-gaz mouillés}) \end{aligned}$$

Ces transformations sont du même type que les transformations irréversibles (I.1) et (I.2) étudiées avec un système de deux tubes ; elles sont donc irréversibles ainsi que l'évolution du système qui en résulte.

L'état initial du système dans le cas des fonctionnements irréversibles (point A_1) résulte du débouchage des tube-liquide où s'écoule un débit d'eau inférieur ou égal au débit l_D défini au paragraphe I.221.1, lorsque l'air est introduit dans la colonne ; cet état dépend donc de la répartition initiale des débits d'eau, alors que l'état final (point A_Z) correspondant au même couple $(\bar{l}, \bar{g})$ dans le cas des fonctionnements réversibles dépend de la répartition initiale des débits d'air.

Sur le graphique I.324 sont représentés d'une part, en pointillé, le diagramme n° I établi pour un tube seul et d'autre part les courbes donnant les couples $(\bar{l}, \bar{g})$ pour lesquels l'air subit une même chute de pression dans le cas des fonctionnements irréversibles;

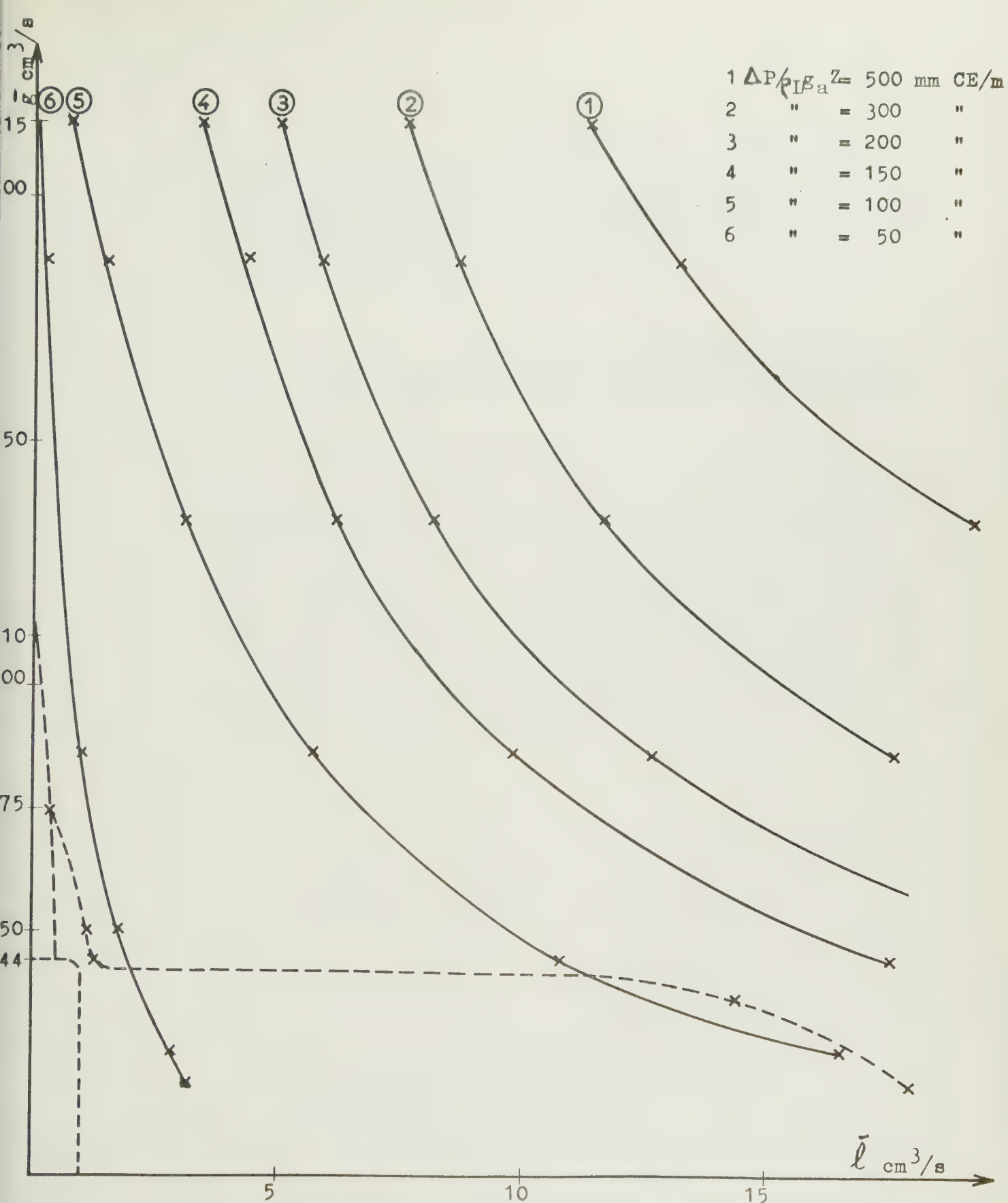
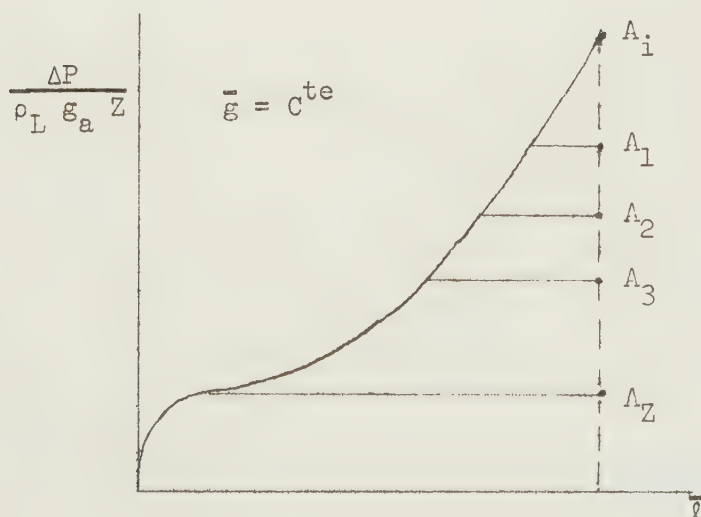


DIAGRAMME DES COUPLES ($\bar{l}$, $\bar{g}$) POUR LESQUELS L'AIR
 SUBIT UNE MEME CHUTE DE PRESSION POUR LES FON-
 TIONNEMENTS IRREVERSIBLES

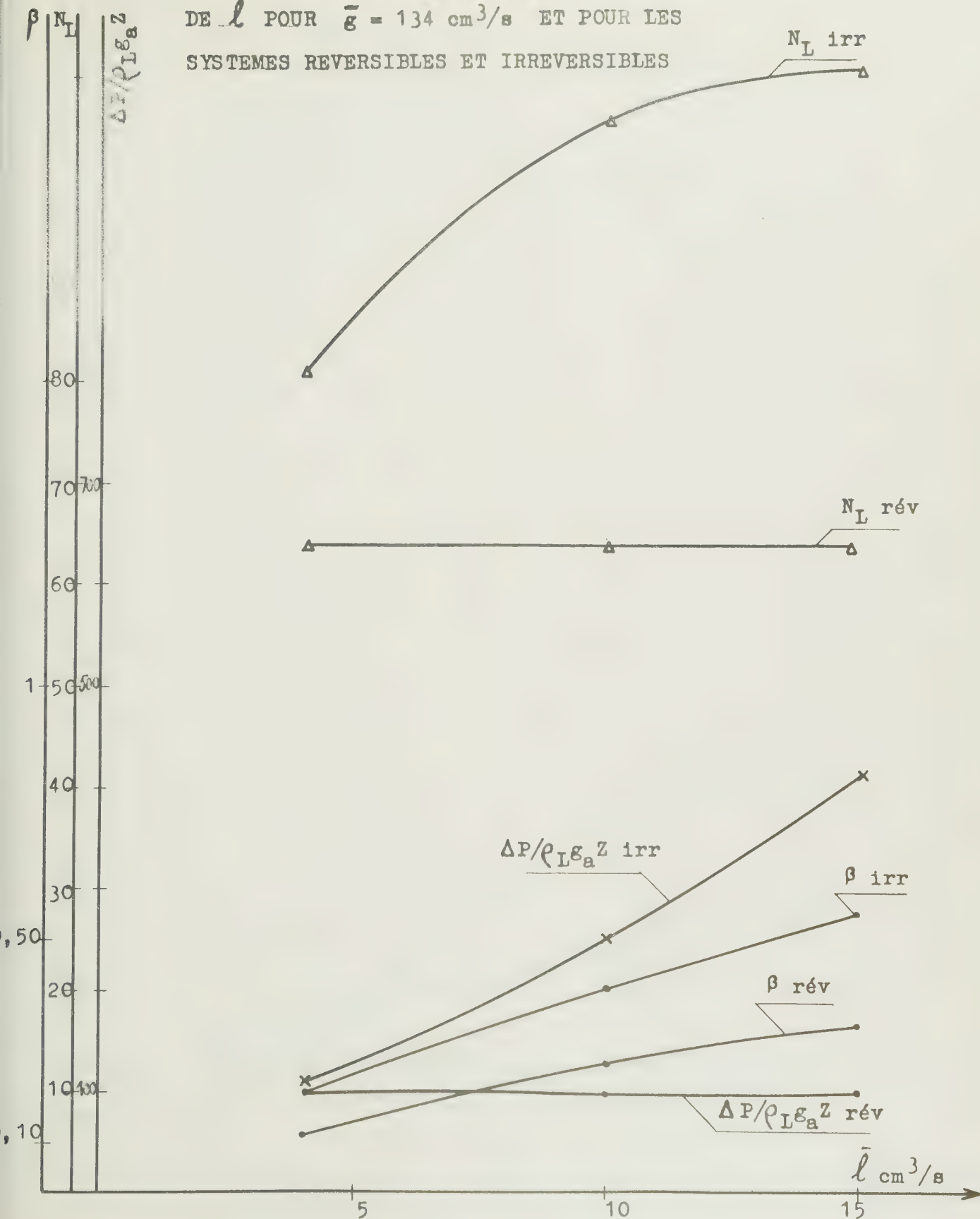
on constate que les points représentant les conditions moyennes de fonctionnement du faisceau sont situés à l'extérieur des domaines d'existence des différents types d'écoulement à contre-courant gaz-liquide dans un tube seul.

I - 324 . 2 Comparaison des valeurs de β , $\frac{\Delta P}{\rho_L g_a Z}$, N_L pour un même couple $(\bar{l}, \bar{g})$ pour les différents systèmes.

On porte sur le graphique I.3242.1 les variations de $\frac{\Delta P}{\rho_L g_a Z}$, N_L et β en fonction de $\bar{l}$ pour $\bar{g}$ égal à $134 \text{ cm}^3/\text{s}$ et sur le graphique I.3242.2 les variations des mêmes grandeurs en fonction de $\bar{g}$ pour $\bar{l}$ égal à $10 \text{ cm}^3/\text{s}$; on constate que quel que soit le couple $(\bar{l}, \bar{g})$ les valeurs de β , $\frac{\Delta P}{\rho_L g_a Z}$, N_L sont, dans le domaine des débits d'eau supérieurs à $3,5 \text{ cm}^3/\text{s}$, plus élevées pour un système irréversible que pour un système réversible ; dans le domaine des débits d'eau inférieurs à $3,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ les valeurs de ces mêmes grandeurs sont pratiquement les mêmes dans les deux cas.

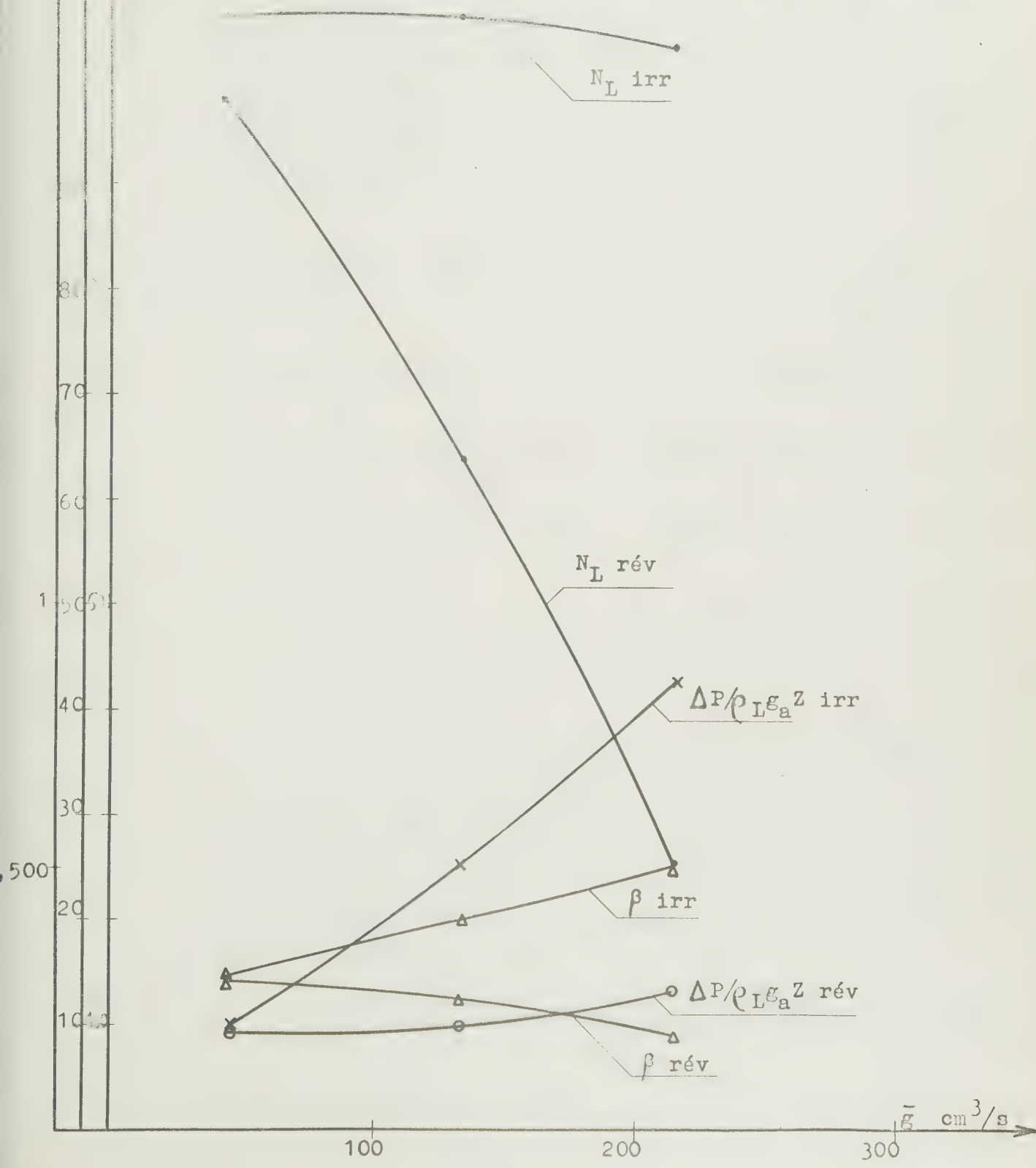


VARIATIONS DE $\Delta P/\rho_L g_a Z$, N_L , β EN FONCTION
DE $\bar{l}$ POUR $\bar{g} = 134 \text{ cm}^3/\text{s}$ ET POUR LES
SYSTEMES REVERSIBLES ET IRREVERSIBLES



Graphique I.3242.1

VARIATION DE $W_{L,1}$, β , $\Delta P/\rho L g_a Z$
 POUR $\bar{G}$ EN cm^3/s ET N_L EN
 UNITÉS ARBITRAIRES



Graphique I.3242.2

L'étude de ces deux types de fonctionnements extrêmes (points A_i et A_Z) nous permet d'obtenir pour chaque couple $(\bar{l}, \bar{g})$ tous les états possibles du système (points A_1, A_2 et A_3) ; les résultats obtenus pour le couple $\bar{l} = 19 \text{ cm}^3/\text{s}$ $\bar{g} = 134 \text{ cm}^3/\text{s}$ sont portés dans le tableau ci-dessous ; on constate que plus le système est irréversible plus les valeurs de N_L , $\Delta P/\rho_L g_a Z$ et β sont grandes.

Etat	A_i	A_1	A_2	A_3	A_Z
N_L	114	111	108	104	80
β en %	69	61	56	50	42
$\Delta P/\rho_L g_a Z$ mm CE/m	540	400	300	200	100

I - 324 . 3 Stabilité des différents systèmes.

Lorsqu'on passe de A_i à A_1 , le nombre de tube-liquide diminue, le débit d'eau pour chacun de ces tubes croît, leur fonctionnement devient donc plus stable, d'autre part, le nombre de ceux qui sont susceptibles de changer d'état diminue, en conséquence le système représenté par A_1 est plus stable que le système représenté par A_i ; il en est de même pour $A_2 \dots A_Z$. Ainsi plus un système est réversible, plus il est stable.

En résumé, l'étude des propriétés du faisceau de tubes à

contre-courant gaz-liquide a permis de mettre en évidence la tendance spontanée à la ségrégation des phases et de mesurer les effets de ce phénomène qui contrôle dans un large domaine ces propriétés dans les cas de fonctionnements réversibles ou irréversibles ; elle a permis en outre de montrer que cet écoulement séparé des phases pouvait conduire à des systèmes différents, plus ou moins stables.

-:-:-:-

Références

- (1) W. NUSSELT - "Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes" - Z. VDI 60 (1916) Nr 27, S. 541-46.
- (2) C.M. COOPER, T.B. DREW et W.H. Mc ADAMS - Trans. Am. ENGRS 30, 158 (1934) - Ind. Eng. Chem. 26, 428 (1934).
- (3) R. FALLAH, T.G. HUNTER et A.W. NASH - J. Soc. Chem. Ind. - 53, 369 T (1934).
- (4) K. FEIND : "Strömungsuntersuchungen bei Gegenstrom von Rieselfilmen und Gas in lotrechten Rohren" - Z. VDI 26 (1960) Nr 481.
- (5) H. BRAUER "Strömung und Wärmeübergang beilRieselfilmen - VDI Forsch Heft 457, Düsseldorf (1956).
- (6) S. KAMEI et J. OISHI - "Hold up in a wetted wall tower" - Mem. Fac. ENGNG, Kyoto University 18 (1956) Nr 1 S. 1-12.
- (7) S. KAMEI, J. OISHI et T. OKANA - J. Soc. Chem. ENGRS Jap. - 18, (1954) Nr 8, S. 364-68.
- (8) E.R. GILLILAND, T.K. SHERWOOD - "Diffusions of vapors into air stream" - Industr. ENGNG Chem. 26 (1934) Nr 5, S. 516-20
- (9) M.L. JACKSON, N.H. CEAGLSKE - Ind. ENGNG. Chem. 42 (1950) Nr 6, S. 1188/98.
- (10) L. Ya ZHIVAIKIN - "Liquid film thickness in film type units" - Int. Chem. ENGNG. Vol 2, Nr 3, juillet 1962, p. 337-41.
- (11) M.L. JACKSON - "Liquid film in viscous flow" - Aiche Journal, Vol. 1, Nr 2, p. 231-40.
- (12) C.G. KIRKBRIDE - Trans. Am. Inst. Chem. ENGRS., 30, 170 (1934).
- (13) S.J. FRIEDMAN et C.O. MILLER - Ind. Eng. Chem., 33, 885 (1941).
- (14) ANDERSON et MANTZOURANIS - "Two phase (gas-liquid) flow phenomena" - Chem. ENGNG. Science 1960, Vol. 12, p. 109-26.
- (15) D.J. NICKLIN, J.F. DAVIDSON - "The onset of instability in two phase slug flow" - Two phase flow Symposium, Inst. Mech. ENGRS. London, Feb. 1962.

- (16) G.B. WALLIS - "Two phase flow problems" - U.S.A.E.C. Bruxelles
Octobre 1962.
- (17) E.Q. BASHFORTH, J.B.P. FRASER, H.P. HUTCHISON et R.M. NEDDERMAN-
"Two phase flow in a vertical tube" - Chem. Eng. Sci. 1963
Vol. 18, p. 41-46.
- (18) S. CALVERT et B. WILLIAMS - "Upward cocurrent annular flow of
air and water in smooth tube" - AIChE Journal, March 1955,
p. 78.
- (19) ADK. LAIRD - "Stability of gas flow in a tube as related to ver-
tical annular gas-liquid flow" - Trans. of ASME, Oct. 1954,
p. 1006.
- (20) S. OSTRACH et A. KÖESTEL - AIChE Journal, Page 302, March 1965,
Vol. 11, Nr 2.
- (21) G.L. KINNEY, A.E. ABRAMSON et J.L. SLOOP - Natl. Advisory Comm.
Aeronaut. Rept. 1087 (1952).
- (22) E.L. KNUTH - Memo n° 20-85, Jet Propulsion Laboratory, California
Institute of Technology, Pasadena, California (1953).
- (23) DUKLER - PhD Thesis, University of Delaware, Newark,
Delaware (1951).
- (24) A.D.K. LAIRD - PhD Thesis, University of California, Berkeley,
California (1951).
- (25) R. KRAUSE - "Untersuchung der Staugrenze von Kondensatfilmen" -
Diplomarbeit Am. Inst. F. Thermodyn., Techn. Hochschule,
Hannover (1955).
- (26) J.H. PERRY - Chemical engineers handbook - New-York 1950 ;
INSBES S. 686.

DEUXIEME PARTIE

ETUDE DE L'ECOULEMENT GAZ-LIQUIDE A CO-COURANT DESCENDANT

DANS UN FAISCEAU DE TUBES

--:--:--:--

C h a p i t r e II - 1

~::~::~~

ETUDE DE L'ÉCOULEMENT GAZ-LIQUIDE A CO-COURANT DESCENDANT DANS UN SEUL TUBE

~::~::~~

II - 11 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.

Les paramètres déterminant les lois de l'écoulement gaz-liquide à co-courant dans un tube sont les suivants :

- la viscosité, la densité, la tension superficielle des deux fluides, leurs débits relatifs.
- le diamètre, la rugosité, la position du tube et le dispositif d'introduction des phases.
- l'accélération de la pesanteur dans le cas d'écoulement horizontal ; le taux d'élévation dans le cas d'écoulement vertical ascendant.

Alors que l'écoulement gaz-liquide à co-courant dans des tubes horizontaux et à co-courant ascendant dans des tubes verticaux a été très étudié, l'écoulement à co-courant descendant dans des tu-

bes verticaux de faible diamètre n'a pratiquement jamais été traité.

L'observation visuelle de l'écoulement gaz-liquide à co-courant dans un tube permet de constater l'existence de différents modes d'écoulement correspondant à des textures différentes du milieu diphasé. Pour l'écoulement vertical ascendant, NICKLIN et DAVIDSON (1) proposent la classification des différents modes d'écoulement suivante :

- Ecoulement "à bulles" : le gaz est dispersé sous forme de petites bulles dont le nombre et la dimension augmentent lorsque le débit de gaz croît.

- Ecoulement par "pistons" : il y a coalescence des petites bulles d'air et formation de grosses bulles occupant presque toute la section du tube ; elles sont séparées par des pistons de liquide et entourées d'un film de liquide qui s'écoule vers le bas. Dans les pistons de liquide se trouvent des petites bulles d'air.

- Ecoulement "écumant" : lorsque l'écoulement descendant du film de liquide autour des bulles d'air cesse, les bulles deviennent instables, le gaz semble former avec le liquide un mélange turbulent sans texture stable ; les éléments de cette texture sont continuellement détruits et reformés.

- Ecoulement "annulaire" : le liquide s'écoule sous forme de film le long des parois du tube alors que le gaz s'écoule au centre en entraînant des gouttelettes de liquide. Lorsque le débit de gaz croît l'épaisseur du film diminue et la quantité d'eau entraînée sous forme de gouttelettes augmente.

- Ecoulement en "brouillard" : à très forte vitesse de gaz tout le liquide est entraîné dans le courant gazeux sous forme de fines gouttelettes ; il peut toutefois encore exister un film de liquide infiniment mince à la paroi.

Les différents types d'écoulement sont représentés sur le schéma II.111. En fonction du débit de gaz croissant, on a passage d'un écoulement où la phase gazeuse est dispersée dans la phase liquide continue à un écoulement où la phase liquide est dispersée dans la phase gazeuse continue.

Pour l'écoulement horizontal ALVES (2) propose une classification des modes d'écoulement représentée sur le schéma II.112.

On constate d'une part que l'existence des modes d'écoulement dépend de la position du tube et, d'autre part, qu'il est plus difficile de les définir dans le cas de l'écoulement vertical ascendant que dans le cas de l'écoulement horizontal.

Il est possible de tracer des diagrammes d'existence de ces différents modes d'écoulement diphasé ; citons celui de BAKER (3) pour l'écoulement horizontal et celui de GRIFFITH et WALLIS (4) pour l'écoulement vertical ascendant. On constate qu'entre deux modes d'écoulement voisins, il existe le plus souvent une zone de transition ; d'autre part, comme le montrent les résultats obtenus par GOVIER (5) le changement de mode d'écoulement ne s'accompagne pas toujours d'un changement de loi de l'écoulement des deux phases.

Les très nombreuses recherches sur l'écoulement gaz-liquide à co-courant peuvent être classées en cinq groupes :

II - 111 Etude d'un type d'écoulement donné.

Seuls les écoulements annulaire et par pistons furent beaucoup étudiés. S. CALVERT et B. WILLIAMS (6), ANDERSON et MANTZOURANIS (7), COLLIER et HEWITT (8) ont fait une analyse théorique de l'écou-

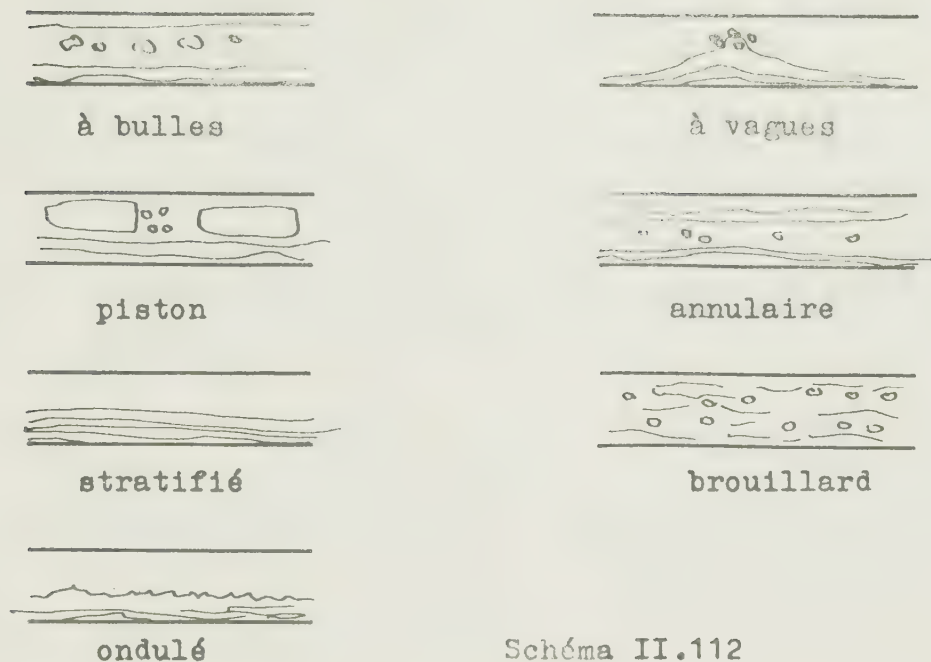


Schéma II.112

Modes d'écoulement selon ALVES (2)

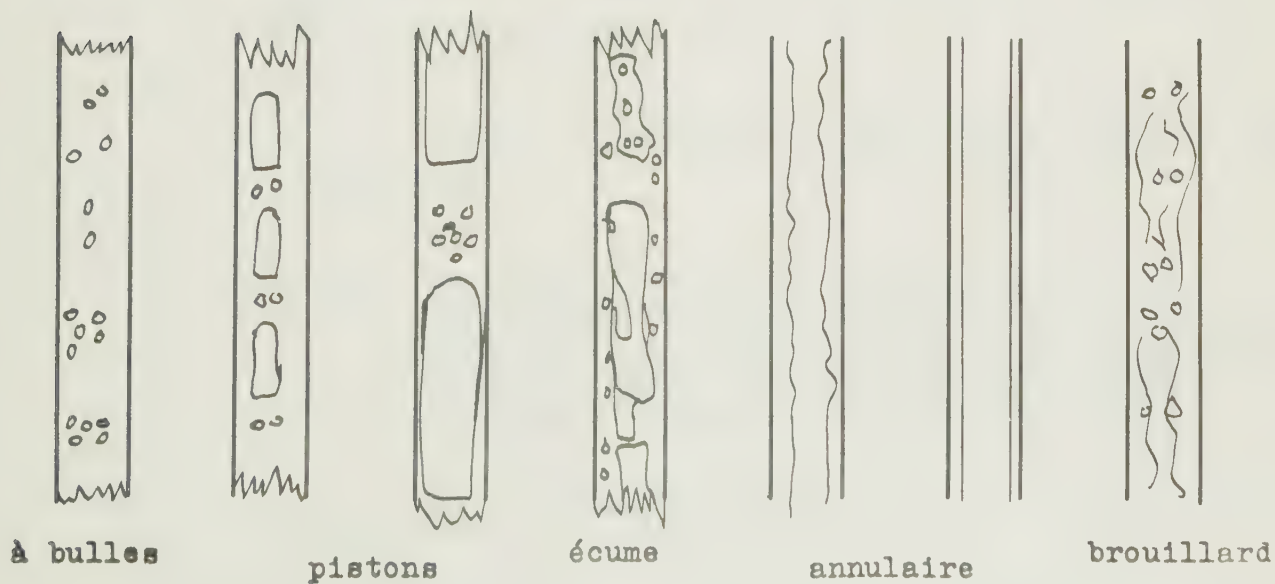


Schéma II.111

Modes d'écoulement selon NICKLIN et DAVIDSON (1)

lement annulaire vertical ascendant, dans le cas où il n'existe pas d'entraînement de gouttelettes d'eau.

ZHIVAIAKIN (9) donne des relations permettant de calculer l'épaisseur de film pour un écoulement annulaire à co-courant vertical ascendant et descendant avec entraînement de gouttelettes dans le courant central de gaz. Ce type d'écoulement a été étudié également par de nombreux autres auteurs (10, 11, 12, 13, 14, 15, 16).

L'écoulement par pistons dans des tubes verticaux a été étudié par GRIFFITH et WALLIS (17), par NICKLIN (18), MOISSIS et GRIFFITH (19), LAPIDUS (20), BRINKMAN (21), MARUCCI (22), STREET (23). Un modèle pour l'écoulement par pistons dans des tubes horizontaux a été proposé par KORDYBAN (24).

L'écoulement stratifié existant uniquement dans des tubes horizontaux à faible débit liquide a été étudié par BERGELIN et GAZLEY (25) et par GAZLEY (26).

BANKOFF (27) présente un modèle mathématique pour l'écoulement dispersé.

II - 112 Relations de LOCKHART et MARTINELLI (28, 29, 30) pour le calcul de la chute de pression subie par les phases et de la fraction de volume occupée par chaque phase.

Pour résoudre le problème, les auteurs font les hypothèses suivantes :

- chaque phase s'écoule dans un milieu de porosité réduite par l'autre phase, en régime laminaire ou turbulent ; on remarque

que ces auteurs ne tiennent pas compte des différents types d'écoulement décrits ci-dessus ; ils considèrent successivement quatre domaines suivant l'écoulement laminaire ou turbulent de chaque phase, comme valeur du nombre de Reynolds correspondant au changement de régime ils choisissent arbitrairement la valeur 2000.

- Il n'existe pas de gradient de pression dans une direction normale à l'écoulement ; la pression statique dans la phase gazeuse est égale à la pression statique dans la phase liquide.

- La somme des volumes occupés respectivement par le liquide et par le gaz est égale à chaque instant au volume du tube.

- L'écoulement diphasé est isotherme.

Les relations empiriques proposées sont :

$$\frac{\left(\frac{\Delta P}{\Delta Z}\right)_{LG}}{\left(\frac{\Delta P}{\Delta Z}\right)_G} = \phi_G^2(\chi) \quad \text{ou} \quad \frac{\left(\frac{\Delta P}{\Delta Z}\right)_{LG}}{\left(\frac{\Delta P}{\Delta Z}\right)_L} = \phi_L^2(\chi) \quad \text{avec} \quad \chi = \left[\frac{\left(\frac{\Delta P}{\Delta Z}\right)_L}{\left(\frac{\Delta P}{\Delta Z}\right)_G} \right]^{1/2}$$

$\left(\frac{\Delta P}{\Delta Z}\right)_{LG}$ est la chute de pression par unité de longueur du système diphasé, le liquide ayant un débit L et le gaz un débit G.

$\left(\frac{\Delta P}{\Delta Z}\right)_G$ est la chute de pression par unité de longueur du gaz seul s'écoulant avec le même débit G.

$\left(\frac{\Delta P}{\Delta Z}\right)_L$ est la chute de pression par unité de longueur du liquide seul s'écoulant avec le même débit L.

Les fonctions de χ , ϕ_G et ϕ_L dépendent du régime de l'écoulement de chaque phase ; quel que soit ce régime χ est une fonction unique du taux de rétention β .

Ces relations sont proposées pour l'écoulement diphasé dans des tubes horizontaux lisses. CHISOLM et LAIRD (31) modifient la relation de LOCKHART et MARTINELLI pour tenir compte de la rugosité de la paroi du tube. HUGHMARK (32) propose une relation nouvelle pour tenir compte de la position du tube. D'après DUKLER, MOYE WICKS et CLEVELAND (33) la meilleure relation pour le calcul de la chute de pression serait celle de LOCKHART et MARTINELLI alors que celle de HUGHMARK donnerait de meilleurs résultats pour le calcul du taux de rétention.

Citons les travaux de HOOGENDORN (34) dans le domaine où la fraction de volume occupée par le gaz est grande, ceux de CHENOWETH et MARTIN (35) qui étudient le domaine des forts débits gazeux pour l'écoulement dans des tubes horizontaux de grand diamètre, ceux de HUGHMARK et PRESSBURG (36) qui montrent l'importance du rôle joué par le débit massique total dans l'interaction des deux phases.

Rappelons enfin les approches théoriques de LEVY (37) et de MARCIATERRE (38).

II - 113 Méthode de résolution dite du "facteur de frottement".

Le système diphasé est assimilé à un système monophasé ; GOVIER et autres (39, 40, 41, 42, 43) présentent les variations d'un facteur de frottement en fonction d'un nombre de Reynolds pour diverses valeurs des débits de gaz et de liquide. Cette méthode générale est également appliquée par d'autres auteurs (44, 45).

II - 114 Résolution par analyse dimensionnelle.

Après avoir relié de nombreux résultats, ROS (46) trouve

que quatre groupes adimensionnels ont un effet sur la chute de pression subie par les phases.

II - 115 Etude de paramètres locaux.

La fraction de volume occupée par le gaz, la vitesse du liquide, la fréquence et le spectre de la taille des bulles ont pu être déterminés à l'aide de mesures électriques sur un système azote-mercure par NASSOS (47) et sur un système air-eau par NEAL L.G. et BANKOFF (48).

II - RESULTATS EXPERIMENTAUX.

De même que dans la première partie de ce travail, on étudie les propriétés de l'écoulement gaz-liquide à co-courant descendant dans un tube afin de les comparer aux propriétés hydrodynamiques du faisceau de tubes et d'interpréter ces dernières à l'aide des premières.

Les dispositifs expérimentaux utilisés sont les mêmes que ceux montés pour l'étude de l'écoulement gaz-liquide à contre-courant, seule l'arrivée d'air, au lieu de se faire à la base des tubes, se fait ici au-dessus du sommet des tubes.

On obtient quatre séries de résultats :

- diagramme des différents types d'écoulement.
- variation de la chute de pression de l'air en fonction du débit d'eau à débit d'air constant.

- variation de la chute de pression de l'air en fonction du débit d'air à débit d'eau constant.

- diagramme des couples (l , g) pour lesquels l'air subit à travers le système une chute de pression donnée.

II - 121 Diagramme des différents types d'écoulement.

La description des différentes textures du milieu diphasé dans un écoulement gaz-liquide descendant est plus délicate que dans le cas des écoulements horizontal et vertical ascendant.

On a fait varier le débit d'air de 0 à $310 \text{ cm}^3/\text{s}$ et le débit d'eau de 0 à $44 \text{ cm}^3/\text{s}$; dans ce domaine des débits étudié on observe quatre types d'écoulement différents :

- Ecoulement annulaire : il existe pour les faibles débits d'eau.

- Ecoulement par pistons : il existe pour les faibles débits d'air et pour les forts débits d'eau.

- Ecoulement pulsé.

- Ecoulement continu d'une émulsion gaz-liquide sans texture définie.

Les écoulements annulaire et par pistons ont le même aspect que les écoulements "par film et contre-courant central d'air" et par "pistons" déjà décrits dans la première partie de ce travail.

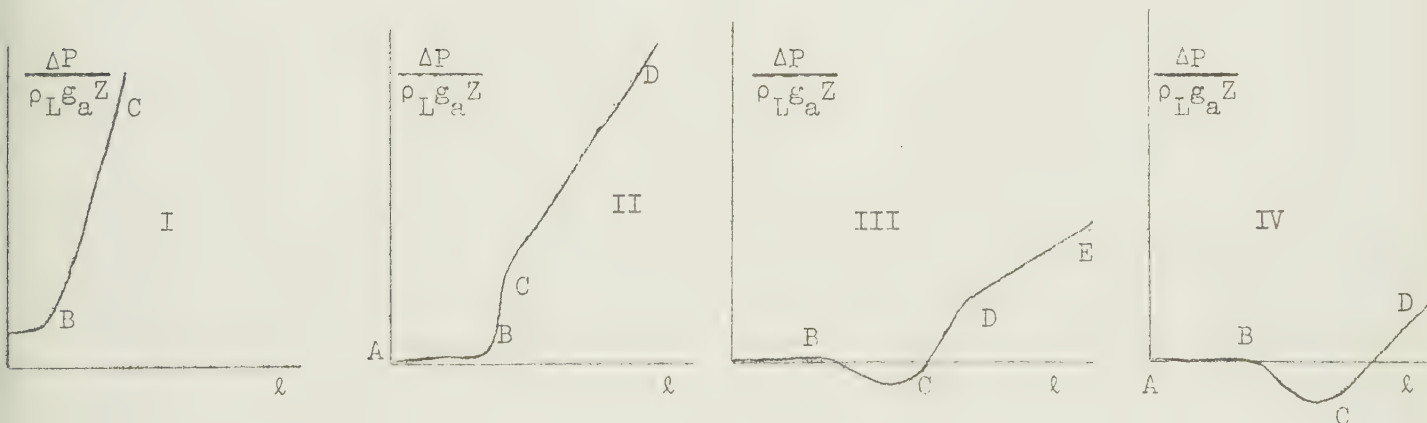
L'écoulement pulsé peut être considéré comme un écoulement de transition entre les écoulements annulaire et par pistons et l'écoulement continu d'une émulsion gaz-liquide ; il résulte du bouchage périodique régulier du tube à son sommet par la formation de pistons

d'émulsion gaz-liquide entraînant des bulles d'air qui occupent toute la section du tube.

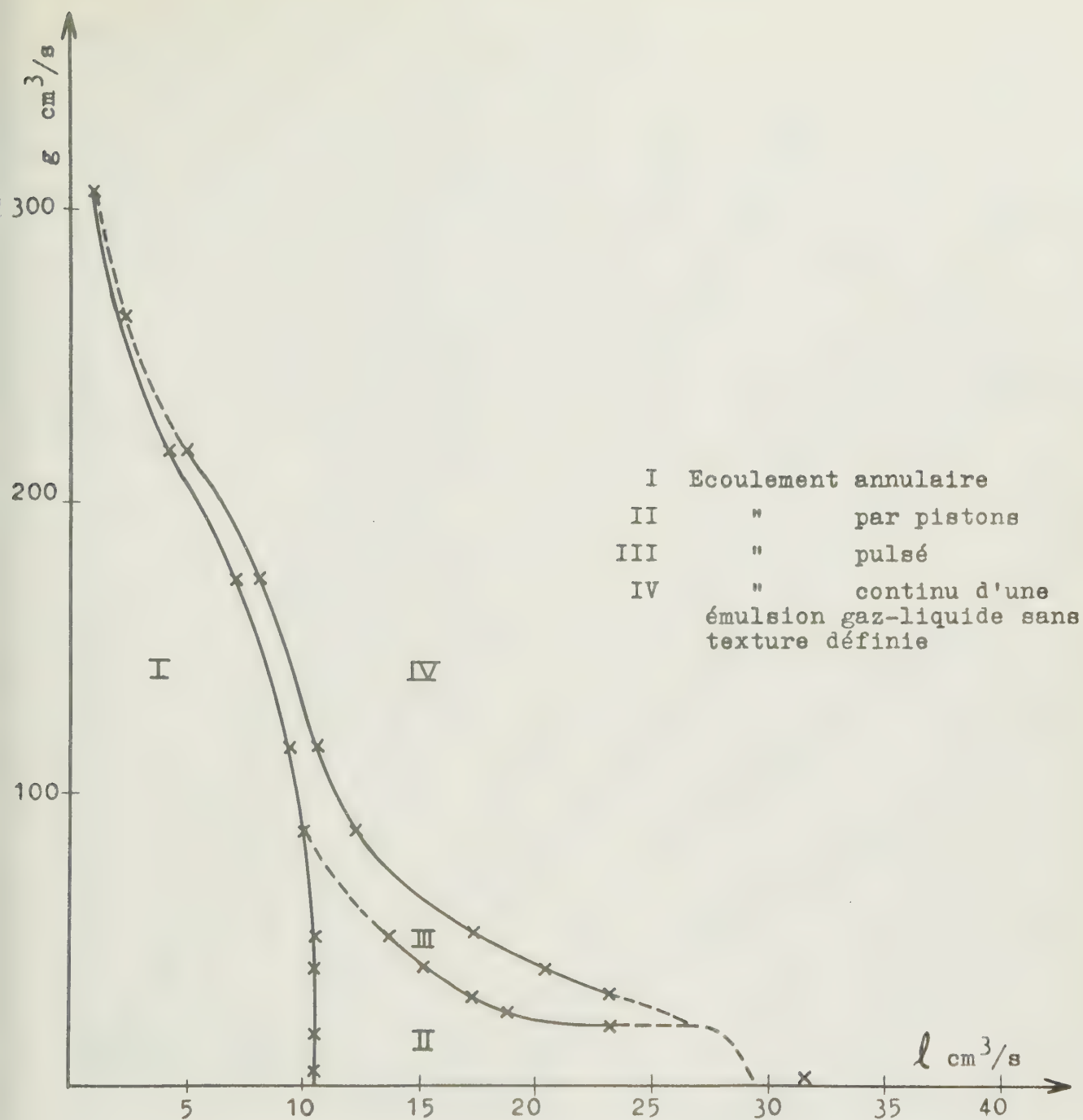
A l'aide de l'observation visuelle et des résultats relatifs à la variation de la chute de pression de l'air en fonction du débit d'eau, on a établi sur le graphique n° II.121 un diagramme où sont portées les limites des domaines d'existence des quatre types d'écoulement observés.

II - 122 Variation de la chute de pression de l'air en fonction du débit d'eau.

Les résultats sont portés sur le graphique II.122 ; on constate qu'il existe quatre types de courbe représentés schématiquement ci-dessous.

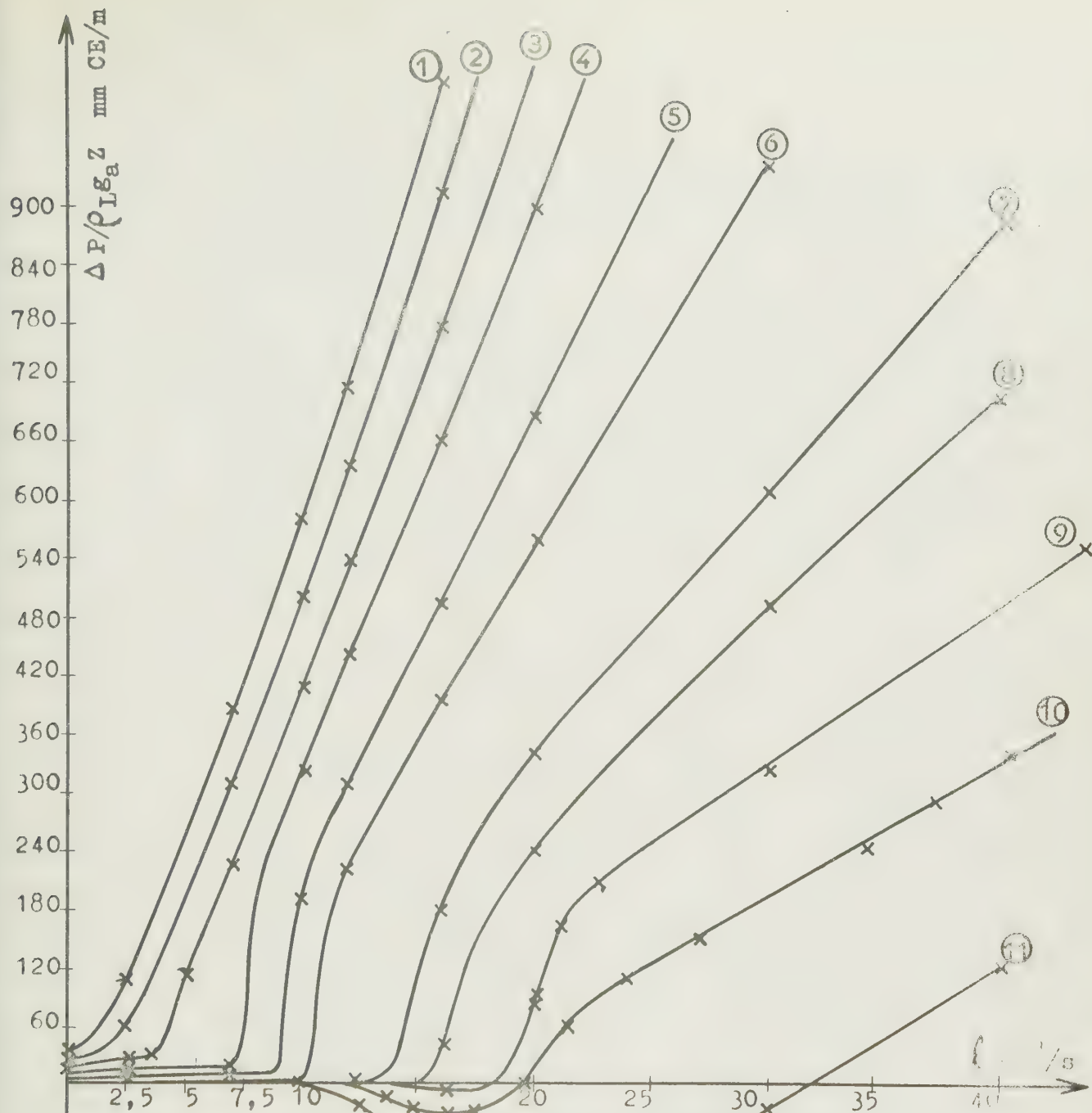


a) les courbes du type I sont obtenues pour des débits d'air supérieurs à $220 \text{ cm}^3/\text{s}$; elles comprennent deux parties : la partie AB correspond à l'écoulement annulaire avec ou sans entraînement de



Graphique II.121

DIAGRAMME DES DOMAINES D'EXISTENCE
 DES DIFFERENTS MODES D'ECOULEMENT



Graphique II.122

VARIATION DE LA CHUTE DE PRESSION
DE L'AIR $\Delta P / \rho_L g_a z$ en fonction de
 l à g constant

1	$g = 307 \text{ cm}^3/\text{s}$
2	$g = 265 \text{ "}$
3	$g = 218 \text{ "}$
4	$g = 174 \text{ "}$
5	$g = 116 \text{ "}$
6	$g = 87 \text{ "}$
7	$g = 51 \text{ "}$
8	$g = 41 \text{ "}$
9	$g = 31 \text{ "}$
10	$g = 25 \text{ "}$
11	$g = 17 \text{ "}$

gouttelettes d'eau, suivant la valeur du débit d'air ; la partie BC correspond à l'écoulement continu d'une émulsion gaz-liquide sans texture définie.

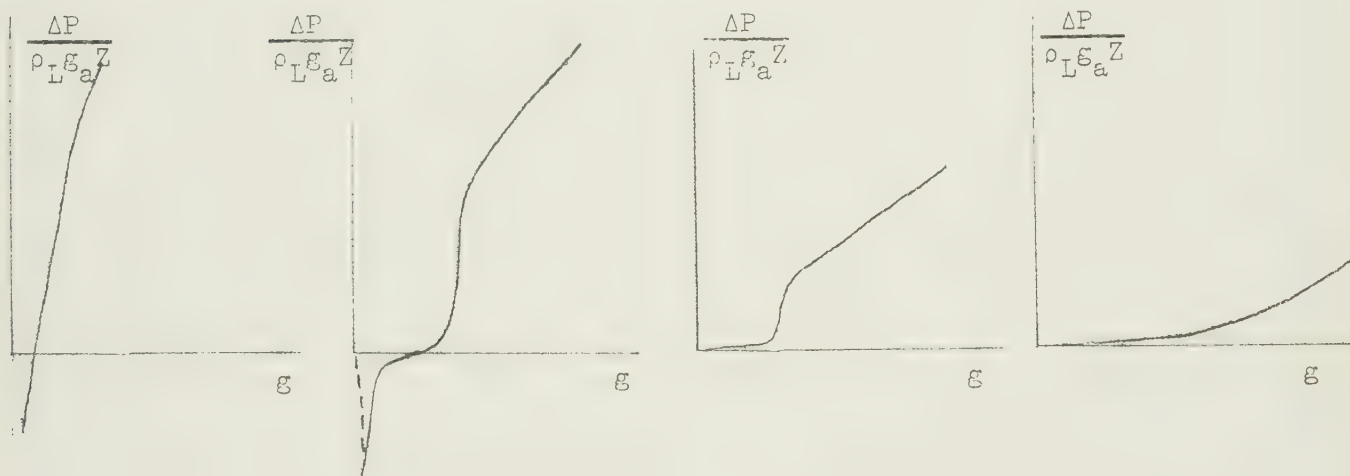
b) Pour les débits d'air compris entre 220 et 80 cm^3/s on obtient les courbes du type II. Le long de AB on a un écoulement annulaire sans entraînement de gouttelettes d'eau, en B apparaît l'écoulement pulsé ; en C les pulsations disparaissent, on a alors un écoulement continu d'une émulsion gaz-liquide le long de CD. On remarque que l'apparition de l'écoulement pulsé se traduit par une augmentation brusque de la chute de pression de l'air.

c) Pour les débits d'air compris entre 80 et 20 cm^3/s , on obtient les courbes du type III ; de même que dans les deux cas précédents, la partie AB, pour laquelle la chute de pression reste faible, correspond à l'écoulement annulaire ; en B on observe l'apparition de l'écoulement par pistons, la chute de pression de l'air prend alors des valeurs négatives ; on a donc en fonction du débit d'eau croissant une diminution de la chute de pression de l'air qui passe ensuite par un minimum. En C il y a apparition de l'écoulement pulsé et augmentation rapide de la chute de pression de l'air. En D les pulsations cessent et on a le long de DE l'écoulement d'un mélange air-eau homogène.

d) Pour les débits d'air inférieurs à 20 cm^3/s , on obtient les courbes IV, elles sont analogues aux courbes III ; dans ce domaine on n'observe plus l'écoulement pulsé ; en C on a passage direct de l'écoulement par pistons à l'écoulement continu d'un mélange gaz-liquide homogène.

II - 123 Variation de la chute de pression de l'air en fonction du débit d'air.

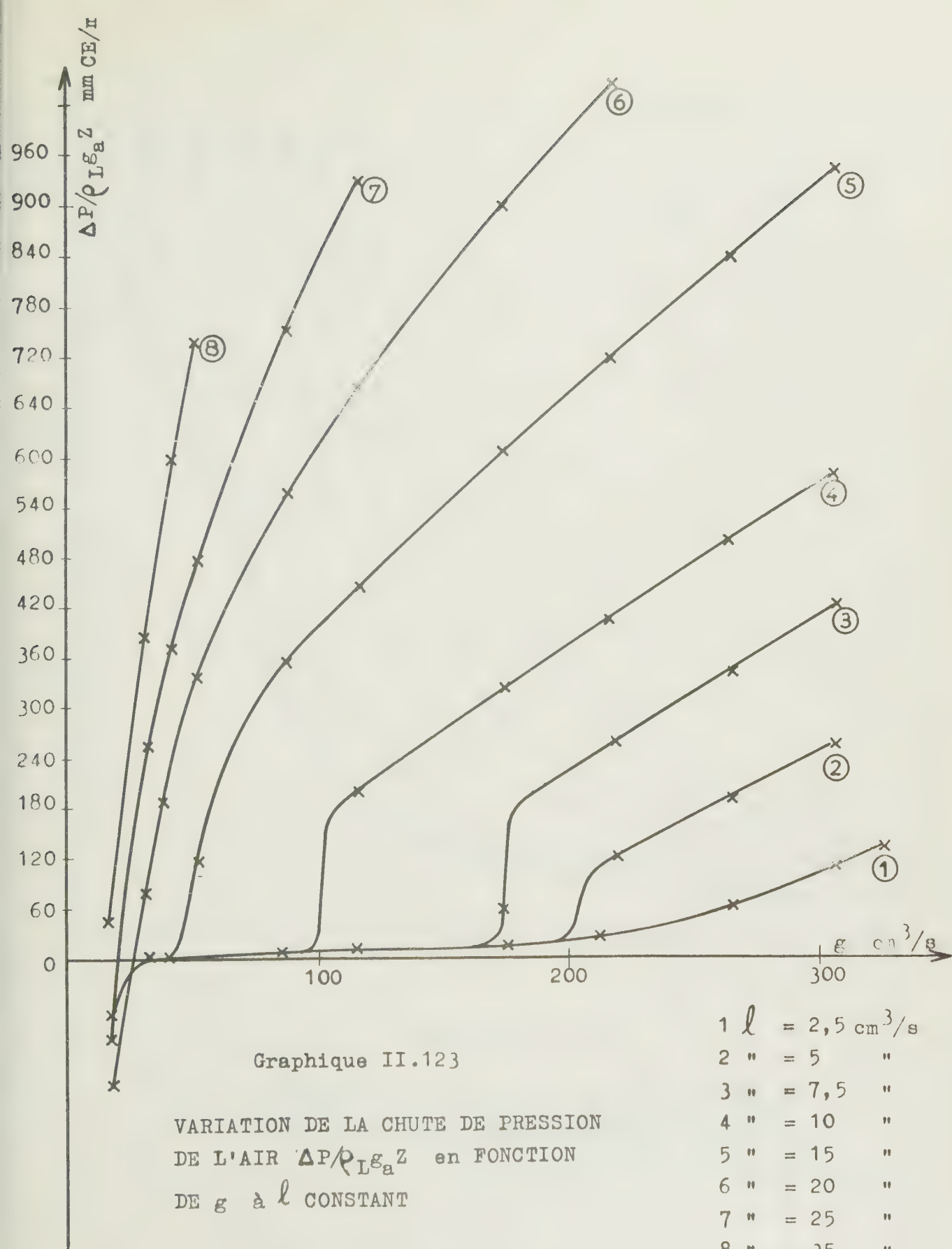
On obtient les courbes représentant la variation de la chute de pression de l'air en fonction du débit d'air à débit d'eau constant, à partir des courbes présentées ci-dessus ; elles sont présentées sur le graphique II.123. De même que précédemment on distingue quatre types de courbes représentés schématiquement ci-dessous, chaque type de courbe présente les différentes parties correspondant aux différents types d'écoulement observés.

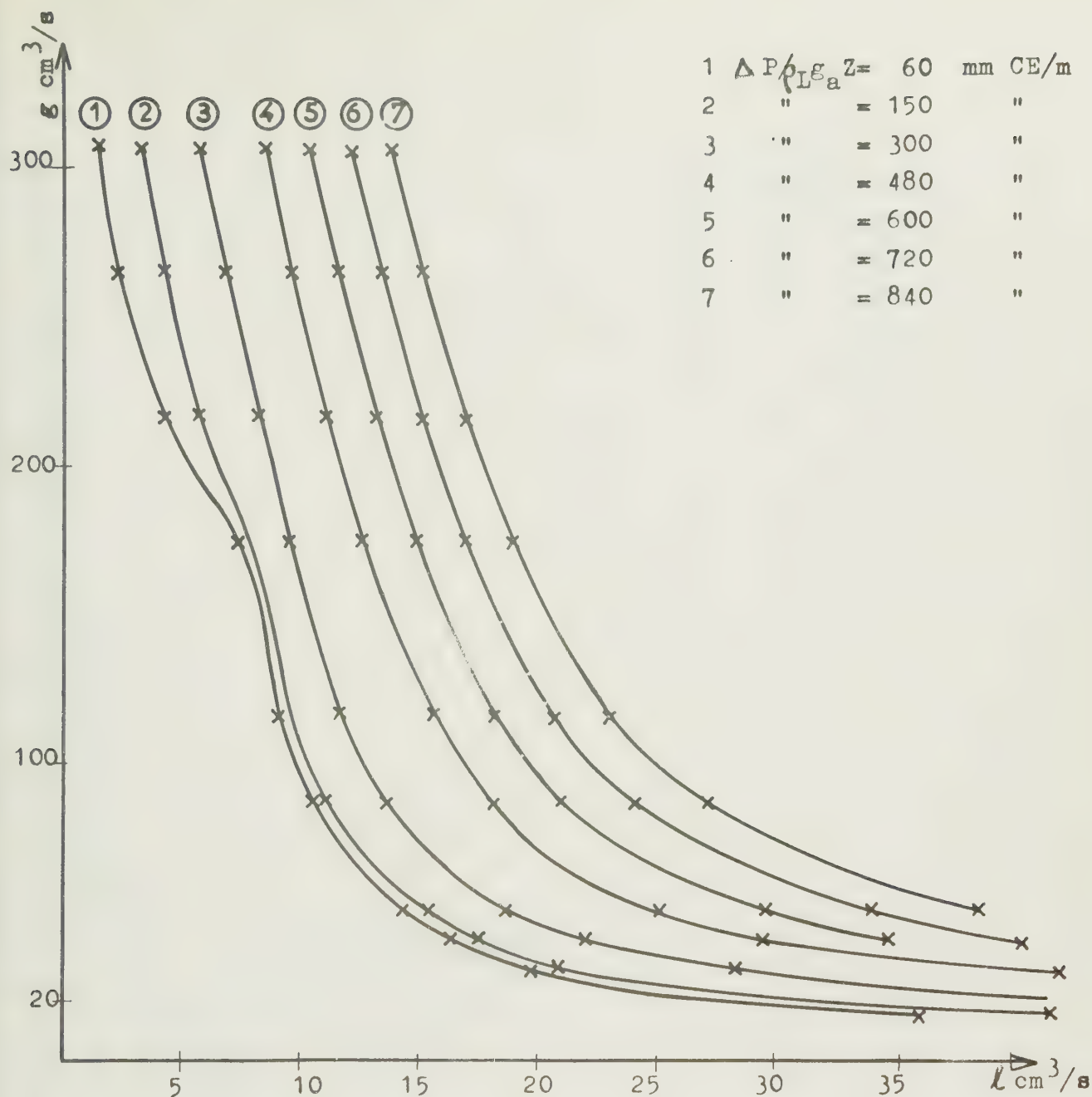


II - 13 CONCLUSION - DIAGRAMME DES COUPLES (l, g) POUR LESQUELS L'AIR SUBIT A TRAVERS LE SYSTEME UNE CHUTE DE PRESSION DONNEE.

Le but que nous nous sommes fixés dans ce chapitre est d'obtenir des résultats expérimentaux relatifs aux propriétés hydrodynamiques d'un tube fonctionnant à co-courant gaz-liquide descendant afin d'interpréter les propriétés hydrodynamiques d'un faisceau de tubes parallèles se trouvant dans les mêmes conditions de fonctionnement.

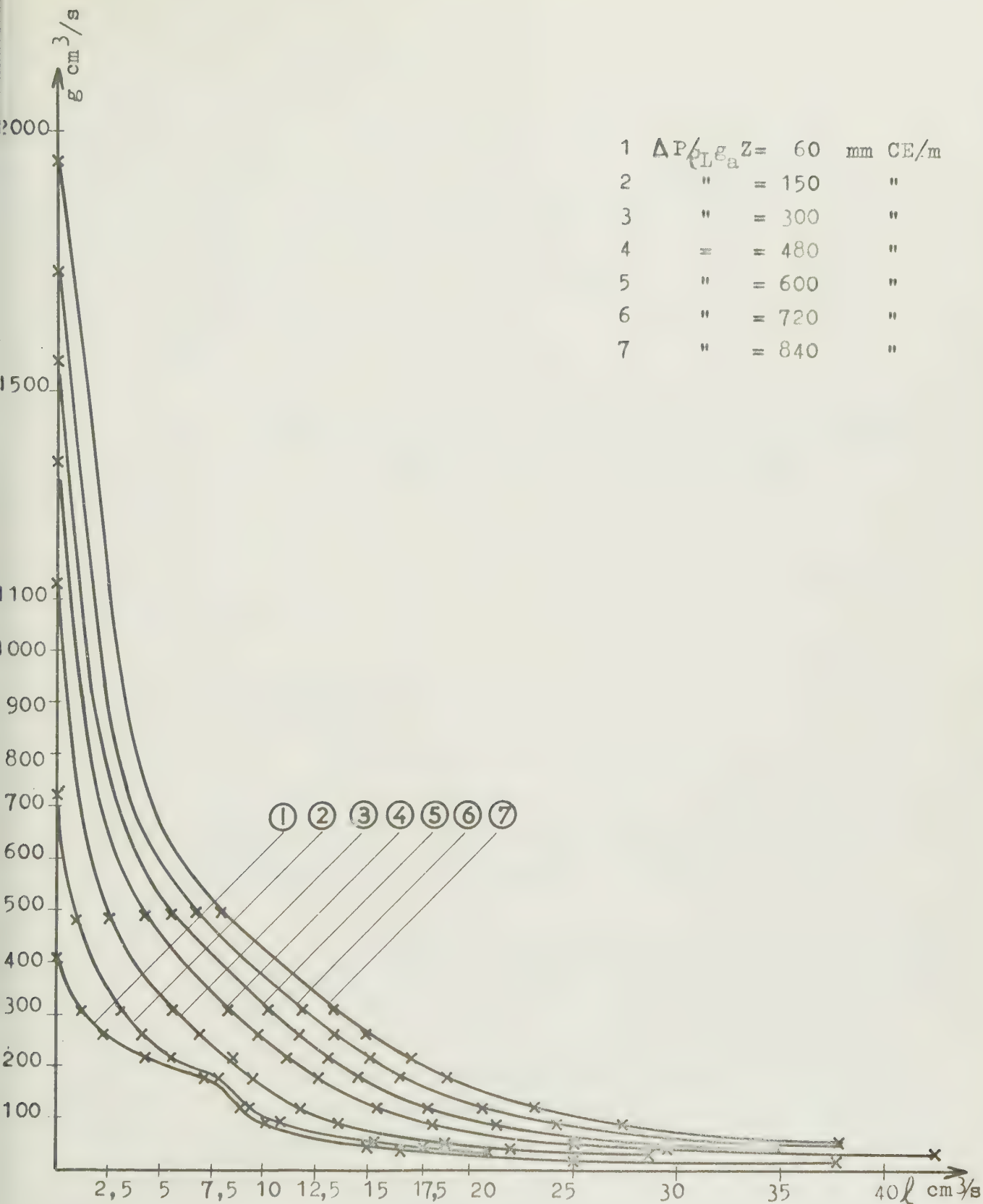
Ceci nous a conduits à établir un diagramme des couples de débits d'air et d'eau pour lesquels l'air subit une même chute de pression; ce diagramme est porté sur les graphiques II.131 et II.132.





Graphique II.131

DIAGRAMME DES COUPLES (l , g) POUR LESQUELS
 L'AIR SUBIT UNE CHUTE DE PRESSION DONNEE



Graphique II.132

DIAGRAMME DES COUPLES (l , g) POUR LESQUELS
L'AIR SUBIT UNE CHUTE DE PRESSION DONNEE

C h a p i t r e I I - 2

-:-:-

ETUDE DE L'ÉCOULEMENT GAZ-LIQUIDE A CO-COURANT DESCENDANT DANS UN FAISCEAU DE TUBES PARALLELES

-:-:-:-

II - 21 INTRODUCTION.

Ayant montré que le fonctionnement d'un faisceau de tubes parallèles à contre-courant gaz-liquide se traduit par l'écoulement séparé des phases, on s'est proposé de rechercher s'il en était de même dans le cas de l'écoulement à co-courant descendant.

Le dispositif expérimental utilisé fut celui monté pour l'étude de l'écoulement à contre-courant, seule l'alimentation en air se fait cette fois au sommet de la section supérieure de la colonne.

Ce chapitre comprendra les paragraphes suivants :

- chute de pression de l'air en fonction du débit d'eau et en fonction du débit d'air.

- comparaison des résultats obtenus dans le cas d'un tube seul et dans le cas d'un faisceau de tubes parallèles.

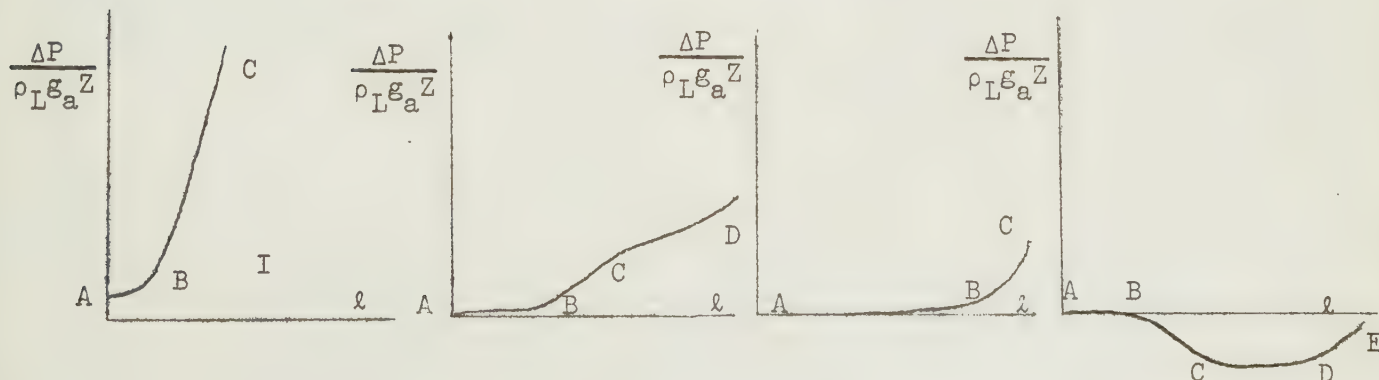
- modèle simplifié pour l'interprétation des propriétés hydrodynamiques du faisceau de tubes.

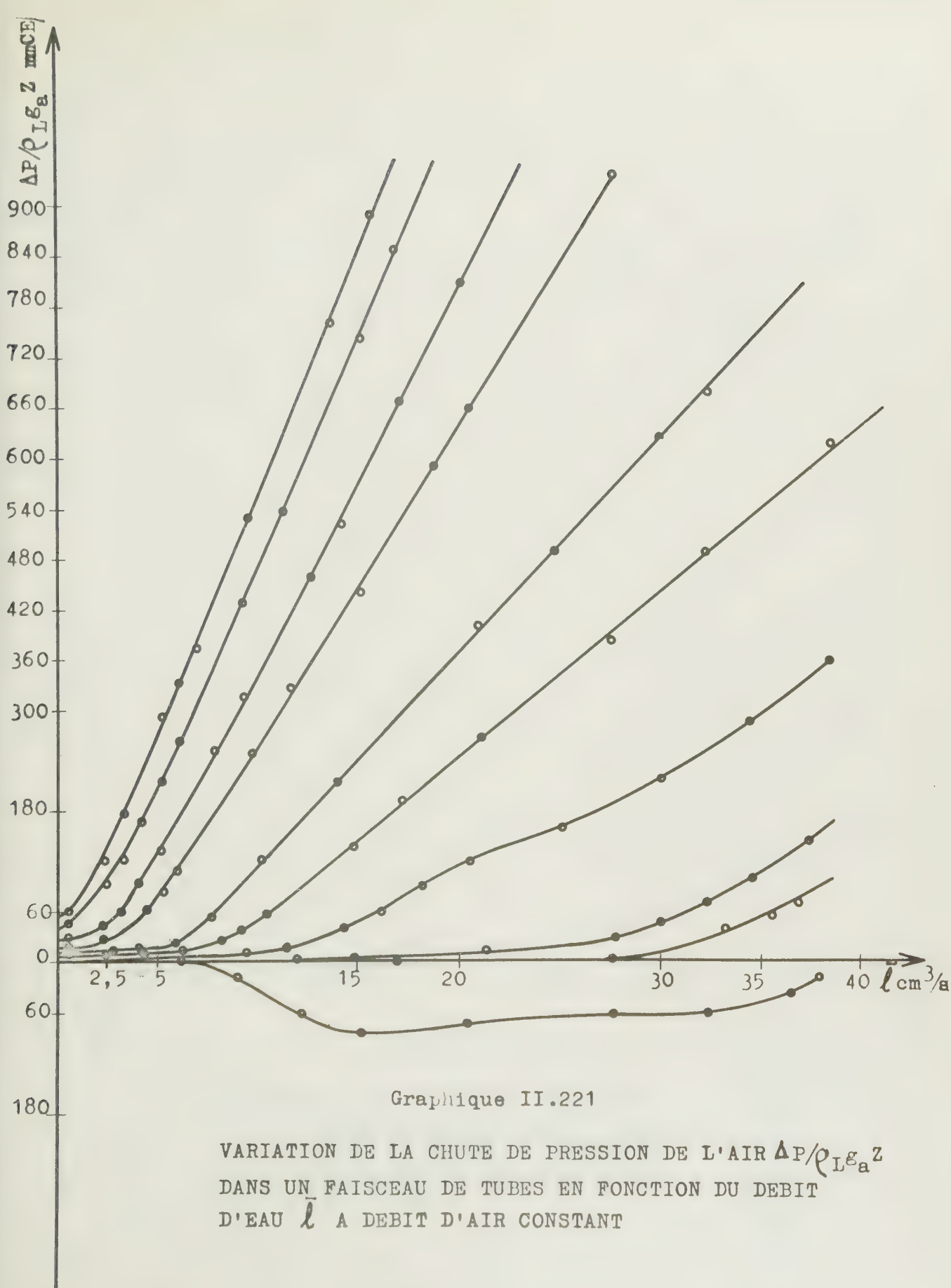
II - 22 ETUDE DES CHUTES DE PRESSION DE L'AIR.

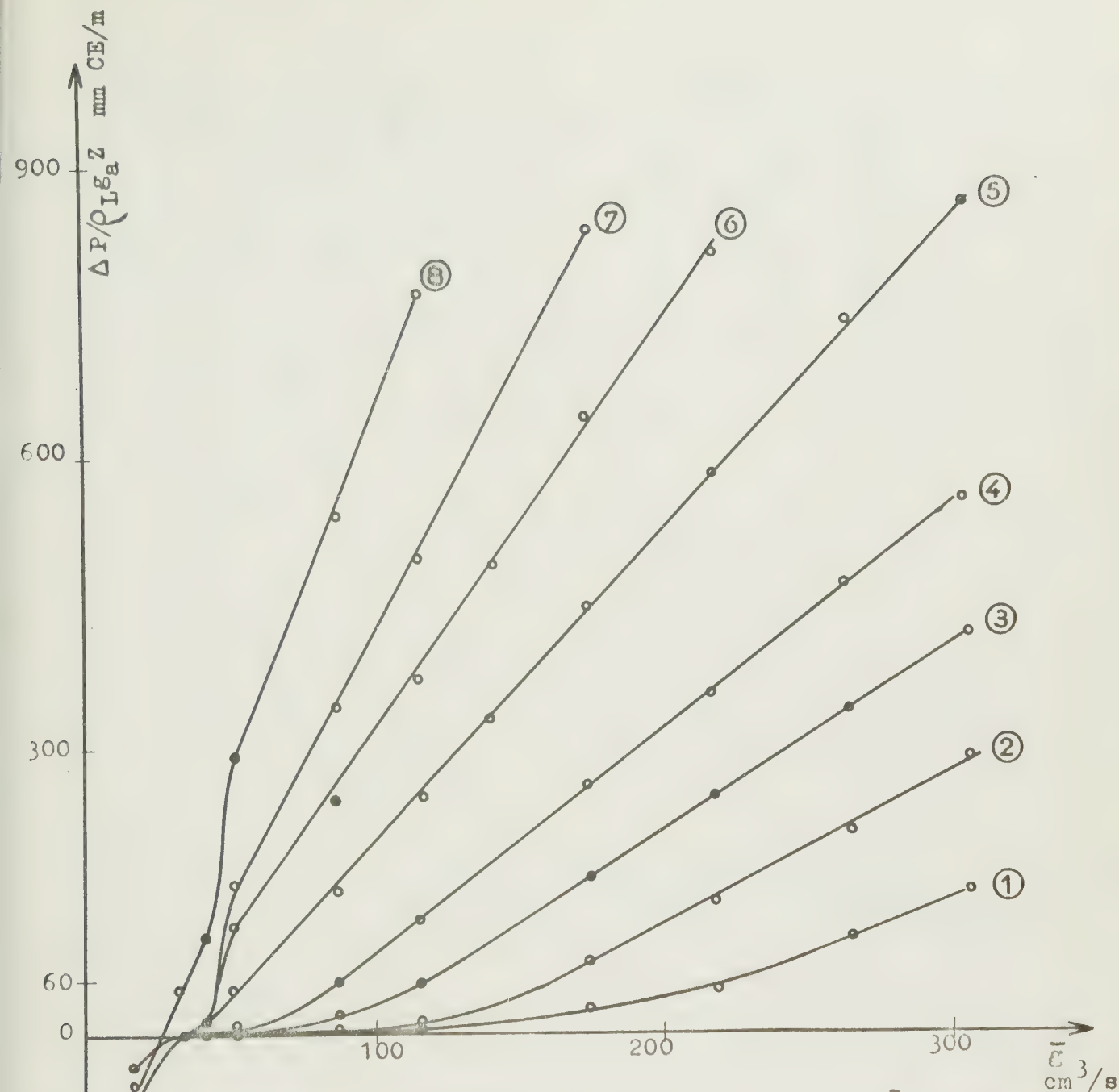
La chute de pression de l'air est étudiée expérimentalement en fonction du débit d'eau, les résultats sont portés sur le graphique II.221 ; de ces résultats on déduit les variations de cette grandeur en fonction du débit d'air (graphique II.222) ainsi que le diagramme des couples de débits d'air et d'eau pour lesquels l'air subit à travers le faisceau de tubes une même chute de pression (graphique II.223).

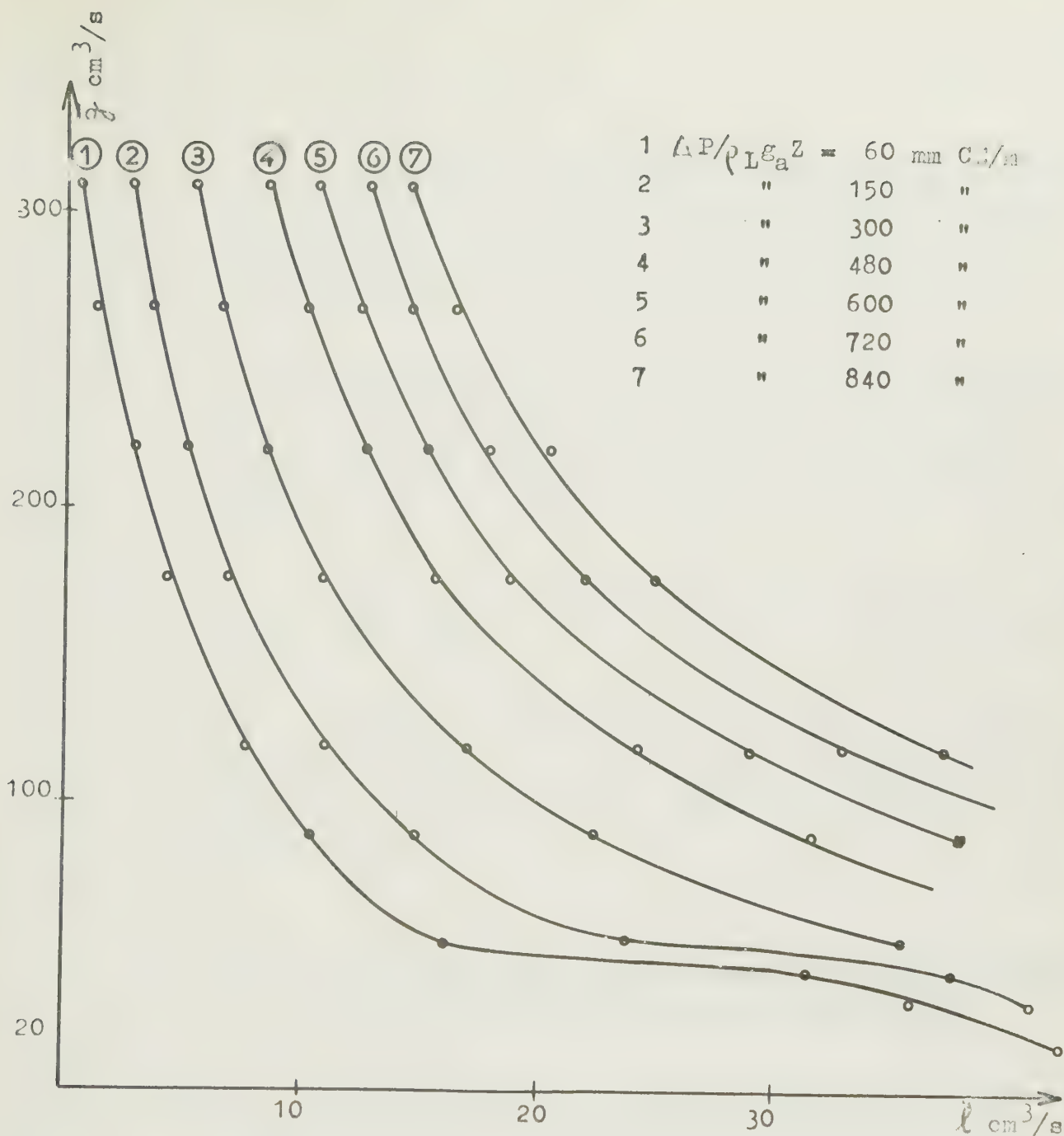
Les débits d'air et d'eau exprimés en cm^3/s sont rapportés à un tube ; leurs valeurs sont les mêmes que celles étudiées au cours des expériences faites avec un tube unique.

On constate l'existence de quatre types de courbe qu'on représente schématiquement ci-dessous.









Graphique II.223

DIAGRAMME DES COUPLES ($\bar{l}$, $\bar{g}$) POUR LESQUELS
 L'AIR SUBIT DANS UN FAISCEAU DE TUBES UNE
 CHUTE DE PRESSION DONNÉE

Les courbes I sont obtenues pour un débit d'air supérieur à $80 \text{ cm}^3/\text{s}$, elles ont la même allure que les courbes I obtenues avec un tube unique ; remarquons que le domaine des débits d'air où elles sont obtenues ici est plus large que dans le cas du tube seul.

Les courbes II sont obtenues pour un débit d'air compris entre $80 \text{ cm}^3/\text{s}$ et $45 \text{ cm}^3/\text{s}$, elles ressemblent aux courbes II obtenues avec un seul tube, toutefois la variation de la chute de pression le long de BC est très amortie par rapport à celle observée avec un tube unique.

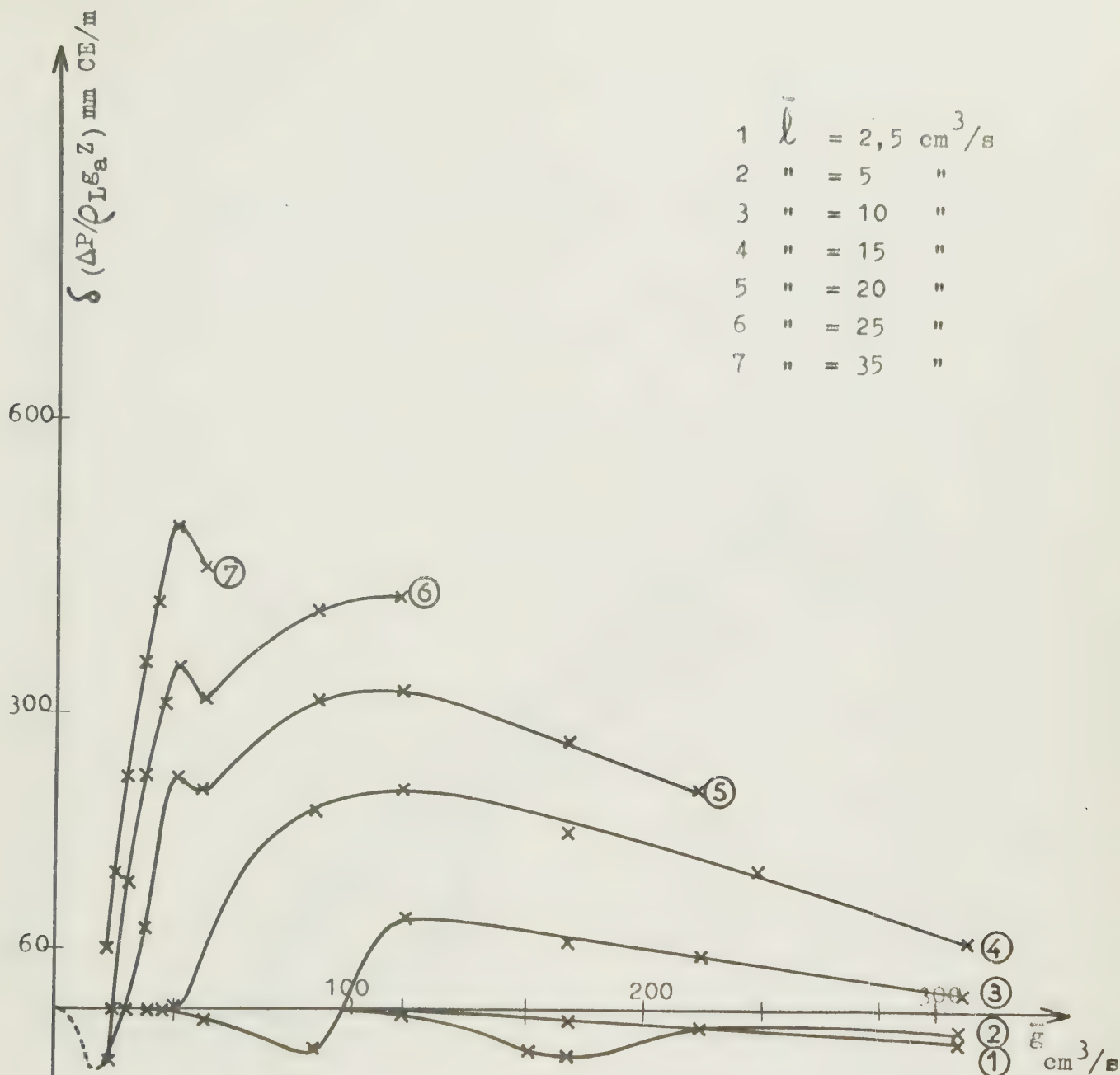
Les courbes III sont obtenues pour un débit d'air compris entre 45 et $20 \text{ cm}^3/\text{s}$.

De même que dans le cas d'un seul tube, pour un débit d'air inférieur à $20 \text{ cm}^3/\text{s}$, la chute de pression de l'air prend des valeurs négatives, elle diminue lorsque le débit d'eau croît, passe par un minimum puis croît.

II - 23 COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS DANS LE CAS D'UN TUBE SEUL ET DANS LE CAS D'UN FAISCEAU DE TUBES PARALLELES.

La superposition des résultats obtenus avec un seul tube et avec un faisceau de tubes parallèles met en évidence les écarts importants entre les chutes de pression subies par l'air dans les deux cas, les conditions expérimentales étant par ailleurs égales ; cette constatation nous a conduit à porter sur les graphiques II.231 et II.232 en fonction des débits d'air et d'eau la quantité

$\delta \left(\frac{\Delta P}{\rho_L g_a Z} \right)$ définie par la relation :

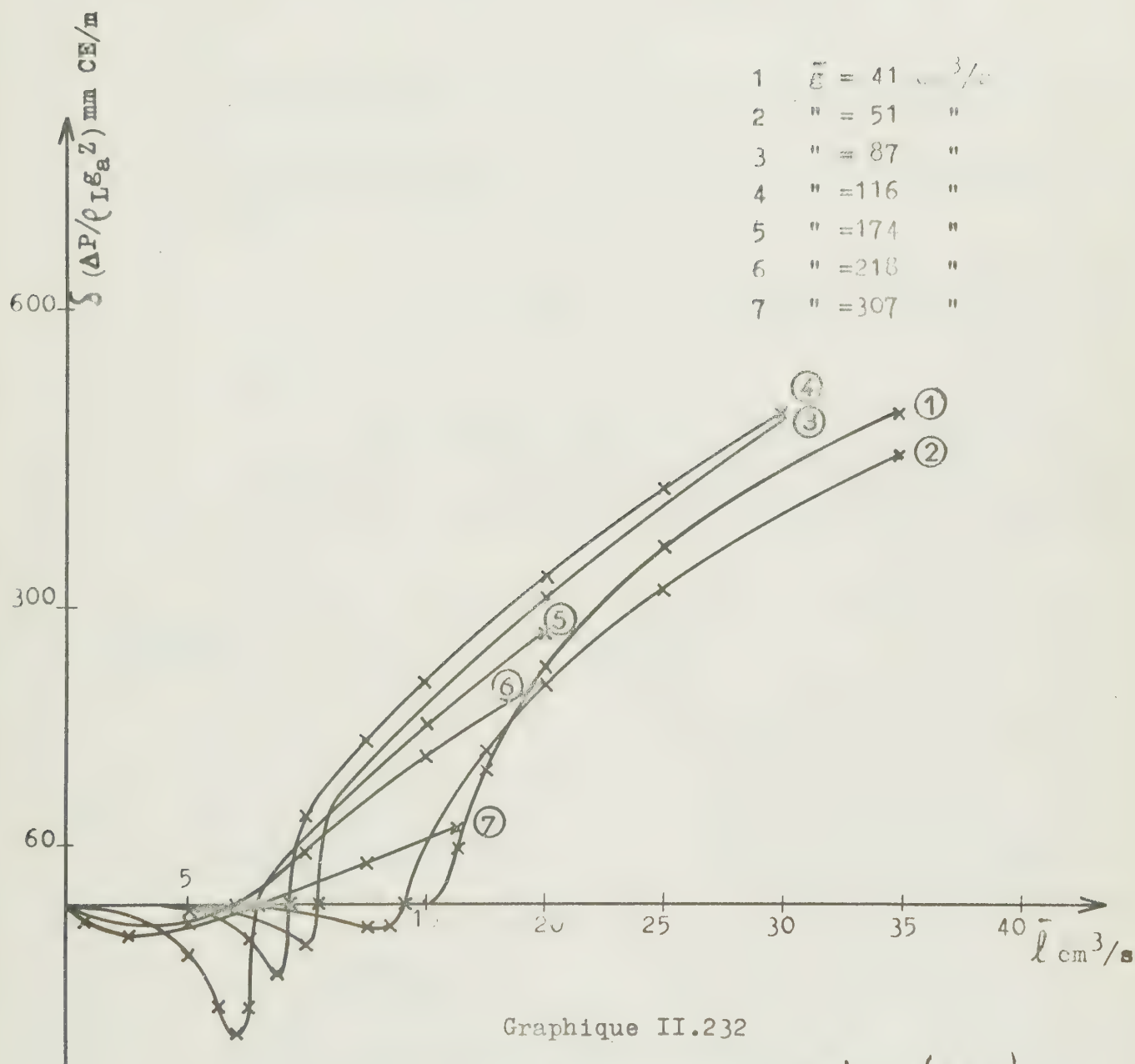


Graphique II.231

VARIATION DE LA QUANTITE $\left(\frac{\Delta P}{\rho L g_a Z} \right)_1 - \left(\frac{\Delta P}{\rho L g_a Z} \right)_2$

EN FONCTION DU DEBIT D'AIR $\bar{g}$

A DEBIT D'EAU CONSTANT



Graphique II.232

VARIATION DE LA QUANTITE $\left(\frac{\Delta P}{\rho_l \epsilon_a Z} \right)_1 - \left(\frac{\Delta P}{\rho_l \epsilon_a Z} \right)_2$

EN FONCTION DU DEBIT D'EAU
 $\bar{l}$ A DEBIT D'AIR $\bar{g}$ CONSTANT

$$\delta \left(\frac{\Delta P}{\rho_L g_a Z} \right) = \left(\frac{\Delta P}{\rho_L g_a Z} \right)_1 - \left(\frac{\Delta P}{\rho_L g_a Z} \right)_2$$

où $\left(\frac{\Delta P}{\rho_L g_a Z} \right)_1$ et $\left(\frac{\Delta P}{\rho_L g_a Z} \right)_2$ sont respectivement les chutes de pression subies par l'air s'écoulant dans un seul tube et dans un faisceau de tubes parallèles.

Sur les schémas I et II ci-dessous sont représentées les allures des courbes obtenues au sujet desquelles on fait les remarques suivantes :

- Pour un débit d'air donné (schéma I), l'air subit pour les faibles débits d'eau une chute de pression plus forte dans le faisceau de tubes que dans le tube seul ; lorsque le débit d'eau croît,

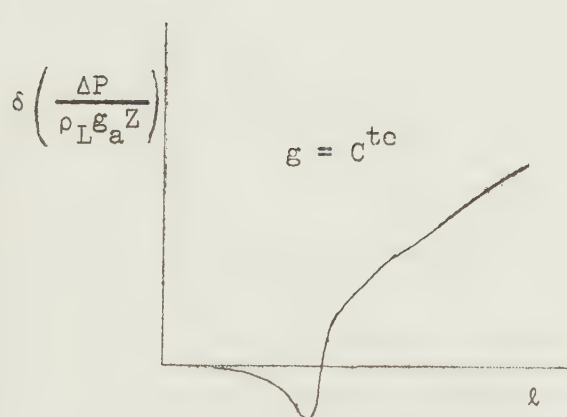


schéma I

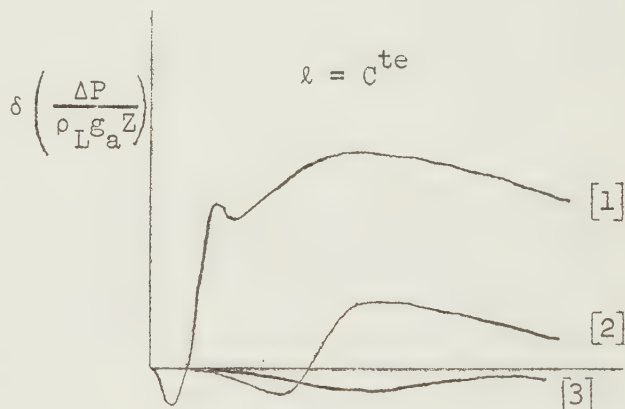


schéma II

l'écart change de sens et la chute de pression de l'air à travers le faisceau devient très inférieure à celle à travers le tube seul. Cet écart s'annule pour une valeur du débit d'eau, fonction du débit d'air étudié.

- En fonction du débit d'air (schéma II), on obtient :

- 1) pour λ supérieur à $19 \text{ cm}^3/\text{s}$ les courbes [1]
- 2) pour λ compris entre 19 et $8 \text{ cm}^3/\text{s}$ les courbes [2]
- 3) pour λ inférieur à $8 \text{ cm}^3/\text{s}$ les courbes [3]

On remarque que pour une valeur suffisante du débit d'eau (courbes [1] et [2]), dans le domaine des forts débits d'air la quantité $\delta \left(\frac{\Delta P}{\rho_L g_a Z} \right)$ diminue lorsque le débit d'air augmente.

II - 24 MODELE SIMPLIFIE POUR L'INTERPRETATION DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES DU FAISCEAU DE TUBES.

Le modèle proposé ici ne tend pas à représenter le fonctionnement exact du faisceau, mais il a pour but de mettre en évidence le processus d'écoulement séparé des phases qui détermine les propriétés hydrodynamiques de ce faisceau.

On suppose que, dans le faisceau de tubes en fonctionnement, il existe deux sortes de tubes : les tube-gaz secs pour lesquels le débit d'eau est nul et les tube-gaz-liquide qui sont tous dans le même état de fonctionnement. A l'aide des résultats obtenus avec un seul tube, on se propose de calculer le nombre de tubes de chaque catégorie et de déterminer comment varie la quantité d'air qui s'écoule à travers le faisceau sans être en contact avec la phase liquide.

II - 241 Méthode de résolution du système.

Soient respectivement N_S et N_L les nombres de tube-gaz secs et de tube-gaz-liquide ; on appelle $\bar{g}_S$, $\bar{g}_L$ et $\bar{\lambda}_L$ les débits d'air et

d'eau s'écoulant dans les tubes de chacune des deux catégories.

ΔP_S et ΔP_L sont les chutes de pression de l'air.

On a les relations évidentes suivantes :

$$[1] \quad N_S + N_L = N$$

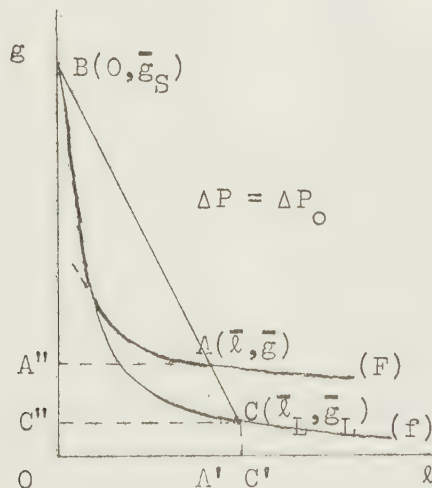
$$[2] \quad N_S \bar{\varepsilon}_S + N_L \bar{\varepsilon}_L = G = N \bar{g}$$

$$[3] \quad N_L \bar{\ell}_L = L = N \bar{\ell}$$

De plus, les tubes étant montés en parallèle, on a :

$$[4] \text{ et } [5] \quad \Delta P_{\text{mesurée}} = \Delta P_S = \Delta P_L$$

On représente sur le schéma ci-dessous une courbe (f) du diagramme (ℓ , g) établi pour le tube seul correspondant à une chute de pression de l'air ΔP_O et son homologue (F) du diagramme ($\bar{\ell}$, $\bar{g}$) établi pour le faisceau de tubes.



Considérons les points A, B et C ; le point A représente l'état de fonctionnement global du faisceau de tubes à travers lequel l'air subit une chute de pression ΔP_O pour un couple de débits d'eau et d'air $(\bar{l}, \bar{g})$ rapportés à un tube. Le point B représente l'état de fonctionnement de tube-gaz secs à travers lesquels pour un débit $\bar{g}_S$ l'air subit la même chute de pression ΔP_O . De même, le point C représente l'état de fonctionnement des tube-gaz-liquide.

Les relations [2] et [3] s'écrivent :

$$[6] \quad N_S \overline{OB} + N_L \overline{OC''} = (N_S + N_L) \overline{OA''}$$

$$[7] \quad N_L \overline{OC'} = (N_S + N_L) \overline{OA'}$$

Le point A représentant l'état global du faisceau peut être considéré comme le barycentre des points B et C représentant respectivement l'état de N_S tube-gaz secs et celui de N_L tube-gaz-liquide. La détermination graphique des nombres N_L et N_S est immédiate, la relation 7 s'écrit en effet :

$$N_L = N \frac{\bar{l}}{\bar{l}_L} = N \frac{\overline{OA'}}{\overline{OC'}}$$

On a alors :

$$N_G = N - N_L$$

II - 242 Résultats.

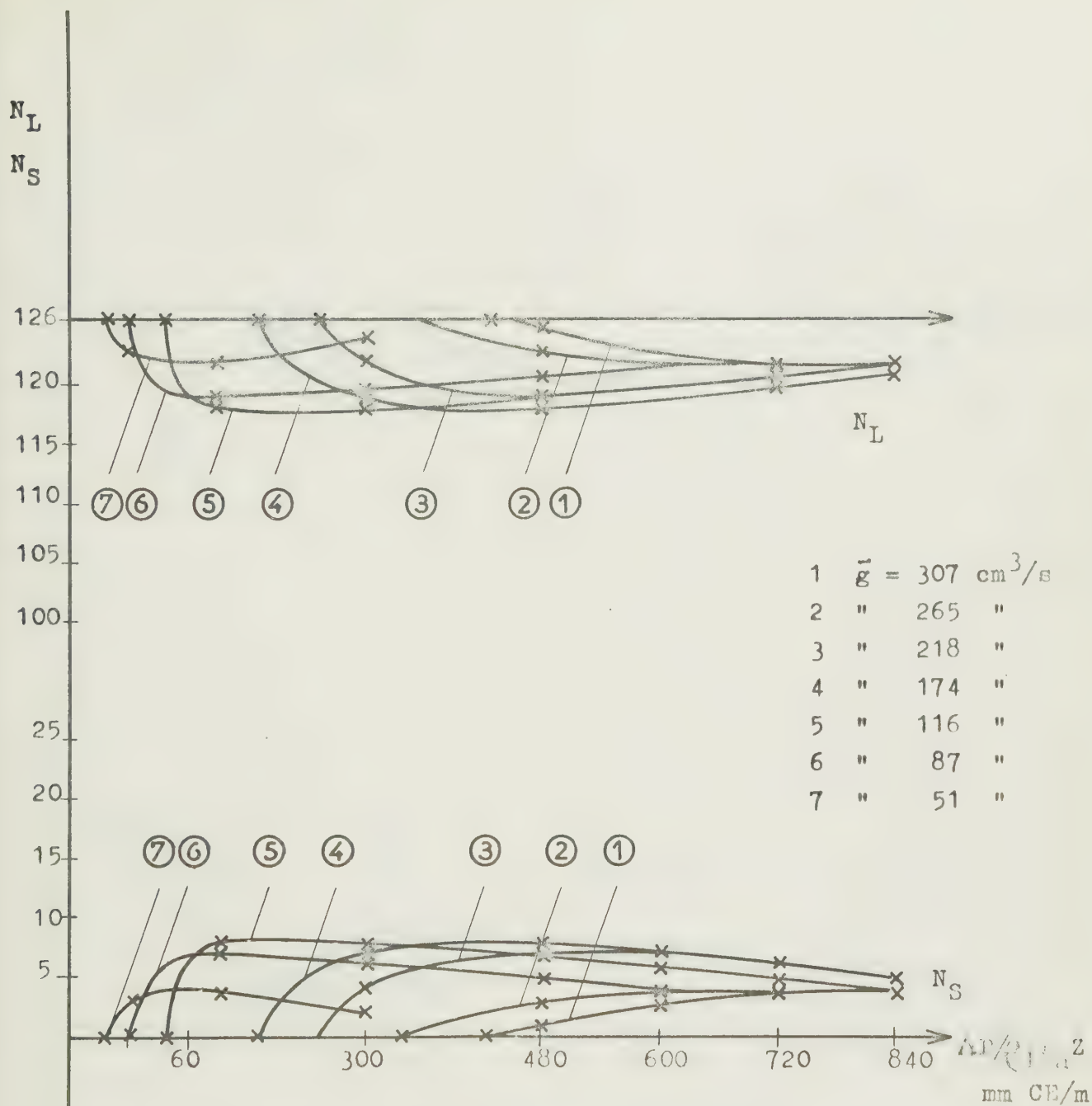
II - 242 . 1 Domaine où $\delta \left(\frac{\Delta P}{\rho_L \bar{g}_a Z} \right)$ est positive.

Les résultats relatifs à ce domaine sont rassemblés dans le tableau II.242.1. Sur les graphiques II.2421.1 à II.2421.6 sont

Tableau II.242.1

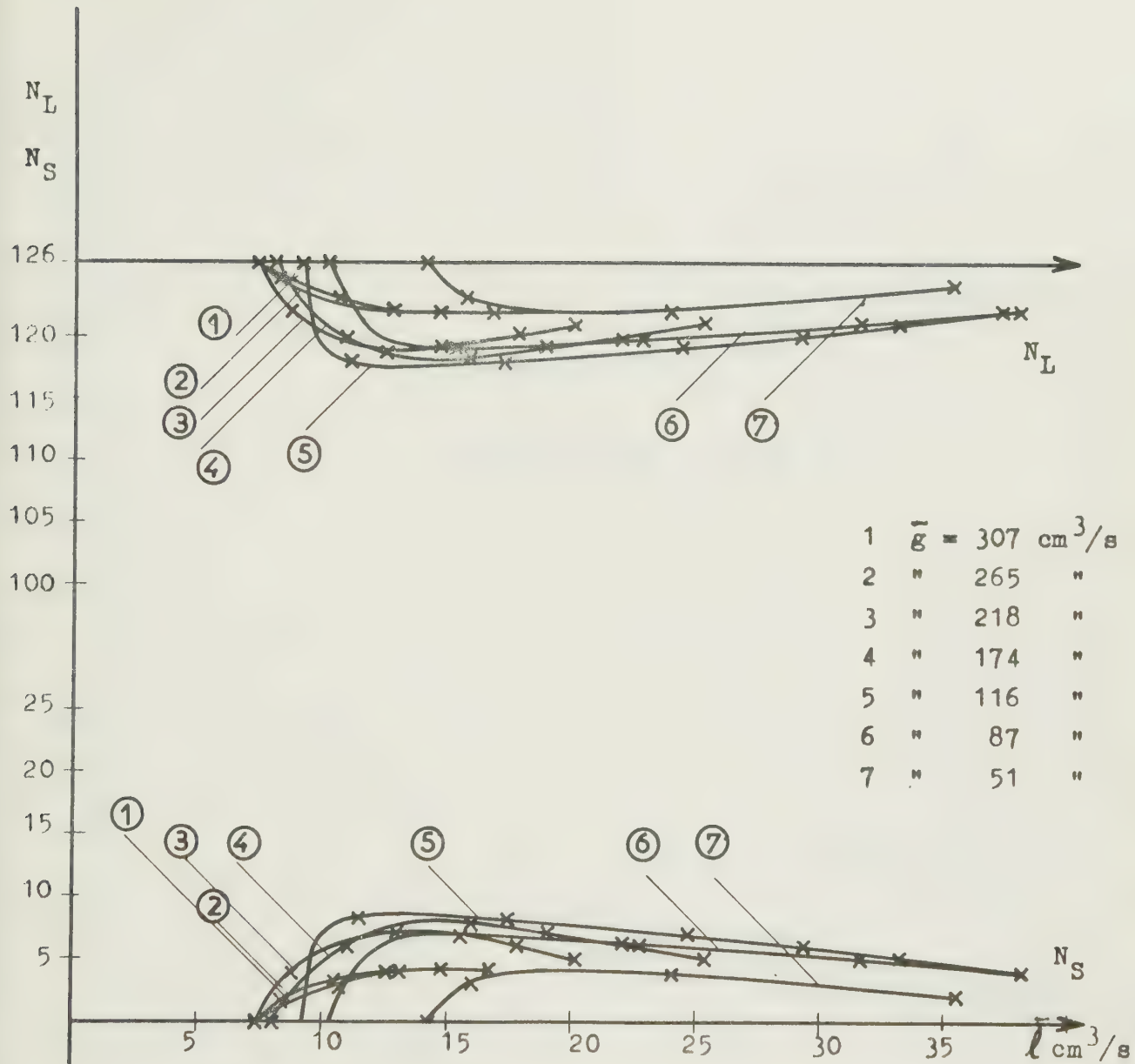
$\frac{\Delta P}{\rho_L g_a Z}$	$\bar{g}_S$	$\bar{l}$	$\bar{l}_L$	N_L	N_S	$N_S \bar{g}_S$	$\frac{N_S \bar{g}_S}{G} \times 100$
en mm CE/m	en cm ³ /s	en cm ³ /s	en cm ³ /s			en cm ³ /s	en %
$\bar{g} = 307 \text{ cm}^3/\text{s} \quad G = 38.700 \text{ cm}^3/\text{s}$							
840	1970	14,75	15,20	122	4	7880	20,4
720	1770	12,90	13,30	122	4	7080	18,3
600	1565	10,75	11	123	3	4695	12,1
480	1360	8,25	8,35	125	1	1360	3,5
$\bar{g} = 265 \text{ cm}^3/\text{s} \quad G = 33.400 \text{ cm}^3/\text{s}$							
840	1970	16,75	17,25	122	4	7880	23,6
720	1770	14,75	15,3	122	4	7080	21,2
600	1565	12,5	12,85	122	4	6260	18,7
480	1360	10,35	10,6	123	3	4080	12,2
$\bar{g} = 218 \text{ cm}^3/\text{s} \quad G = 27.470 \text{ cm}^3/\text{s}$							
840	1970	20,1	20,9	121	5	9850	35,8
720	1770	17,8	18,7	120	6	10620	38,6
600	1565	15,4	16,3	119	7	10955	39,8
480	1360	12,8	13,6	119	7	9520	34,6
300	1025	8,75	9	122	4	4100	14,9

$\frac{\Delta P}{\rho_L \bar{g}_a Z}$ en mm CE/m	$\bar{g}_S$ en cm ³ /s	$\bar{l}$ en cm ³ /s	$\bar{l}_L$ en cm ³ /s	N_L	N_S	$N_S \bar{g}_S$	$\frac{N_S \bar{g}_S}{G} \times 100$ en %
$\bar{g} = 174 \text{ cm}^3/\text{s} \quad G = 21.920 \text{ cm}^3/\text{s}$							
840	1970	25,25	26,4	121	5	9850	45
720	1770	22,10	23,25	120	6	10620	48,5
600	1565	19	20,05	119	7	10955	50
480	1360	15,9	16,9	118	8	10880	49,5
300	1025	11	11,6	119	7	6150	28
$\bar{g} = 116 \text{ cm}^3/\text{s} \quad G = 14.620 \text{ cm}^3/\text{s}$							
840	1970	37,5	38,8	122	4	7880	54
720	1770	33,25	34,5	121	5	8850	60,4
600	1565	29,25	30,65	120	6	9360	64
480	1360	24,5	25,8	119	7	9520	65
300	1025	17,25	18,35	118	8	8200	56
150	720	11,25	12	118	8	5760	39,4
$\bar{g} = 87 \text{ cm}^3/\text{s} \quad G = 10.960 \text{ cm}^3/\text{s}$							
600	1565	38,15	39,5	122	4	6260	59,8
480	1360	31,6	32,9	121	5	6800	62
300	1025	22,75	23,85	120	6	6150	56,2
150	720	15	15,85	119	7	5040	46
60	410	10,30	10,30	126	0	0	0
$\bar{g} = 51 \text{ cm}^3/\text{s} \quad G = 6.430 \text{ cm}^3/\text{s}$							
300	1025	35,3	36	124	2	2050	32
150	720	24	24,85	122	4	2880	44,8
60	410	16	16,4	123	3	1230	19,1



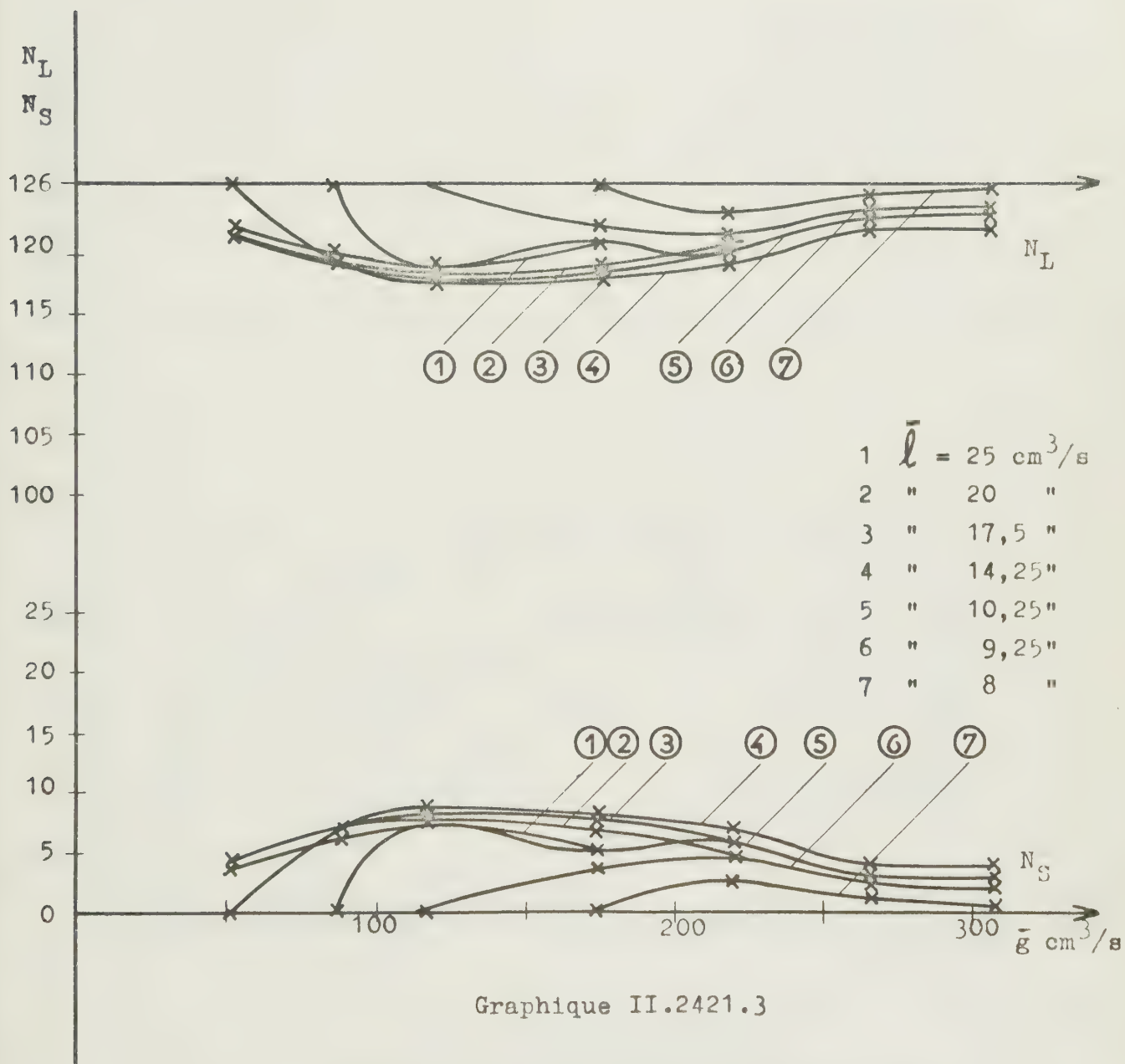
Graphique II.2421.1

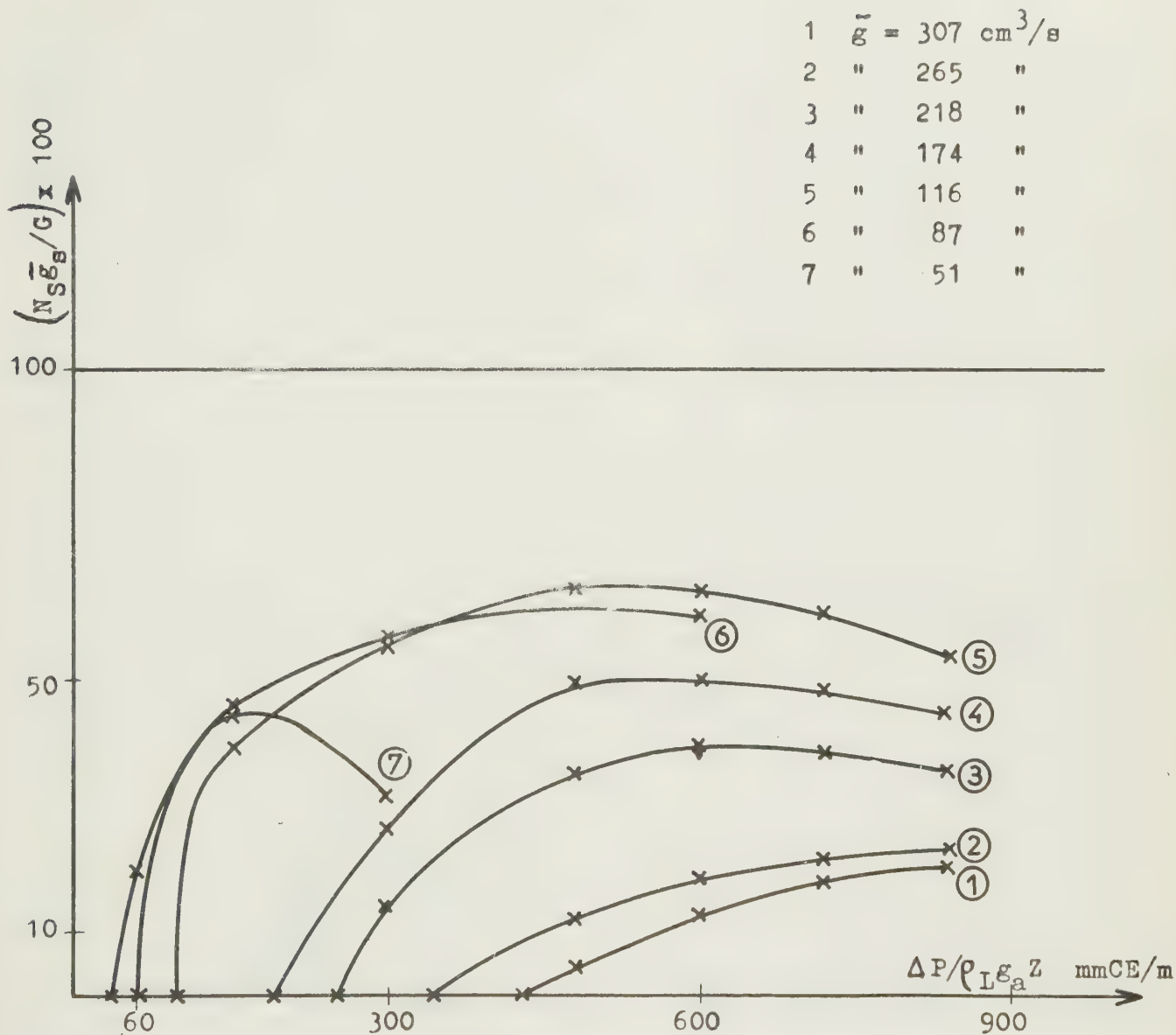
VARIATIONS DES NOMBRES DE TUBES N_S et N_L
 EN FONCTION DE $\Delta P / \rho_L g_a Z$ à $\tilde{g}$ CONSTANT



Graphique II.2421.2

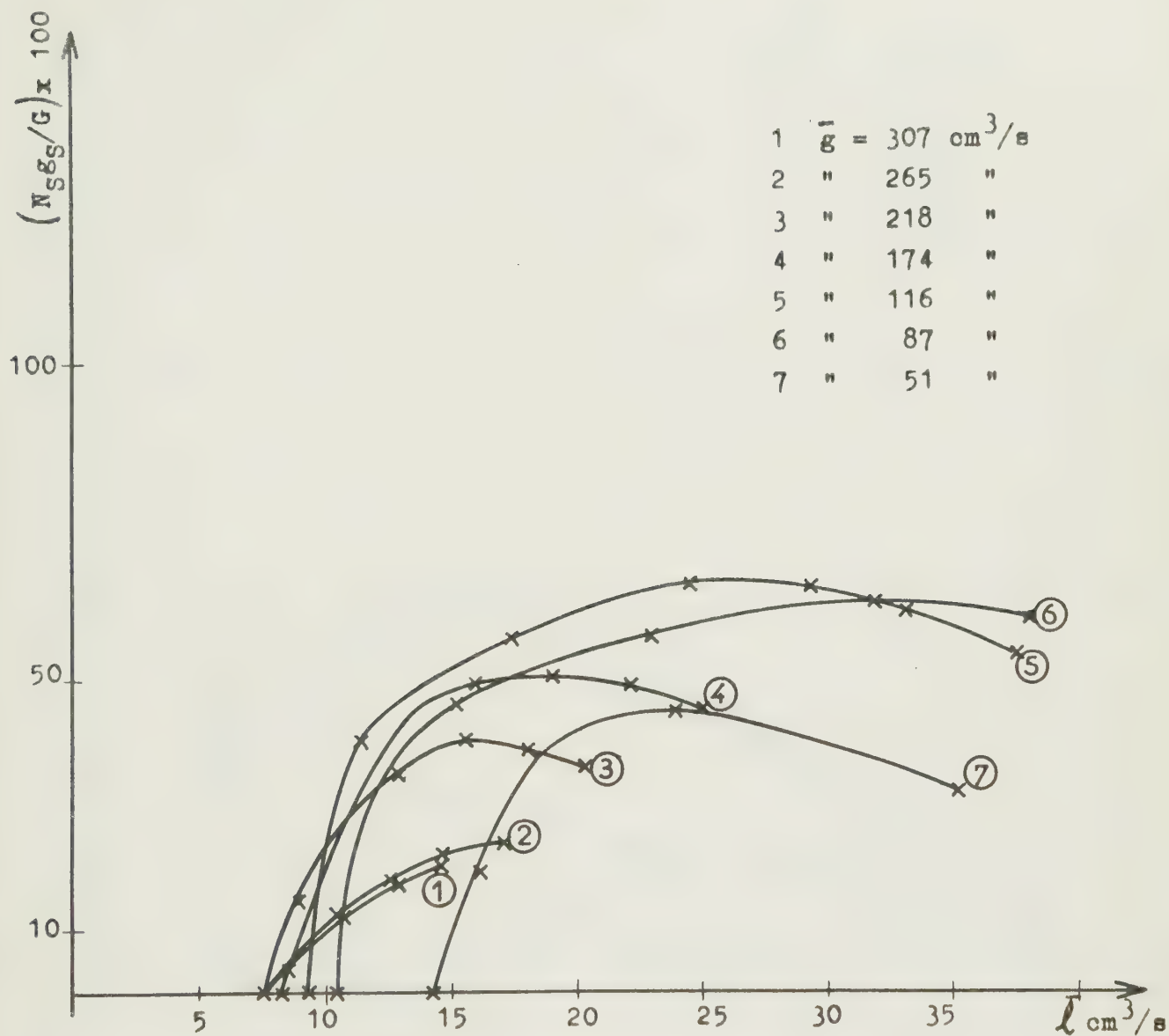
VARIATION DES NOMBRES DE TUBES N_S et N_L
EN FONCTION DE $\bar{l}$ à $\bar{g}$ CONSTANT





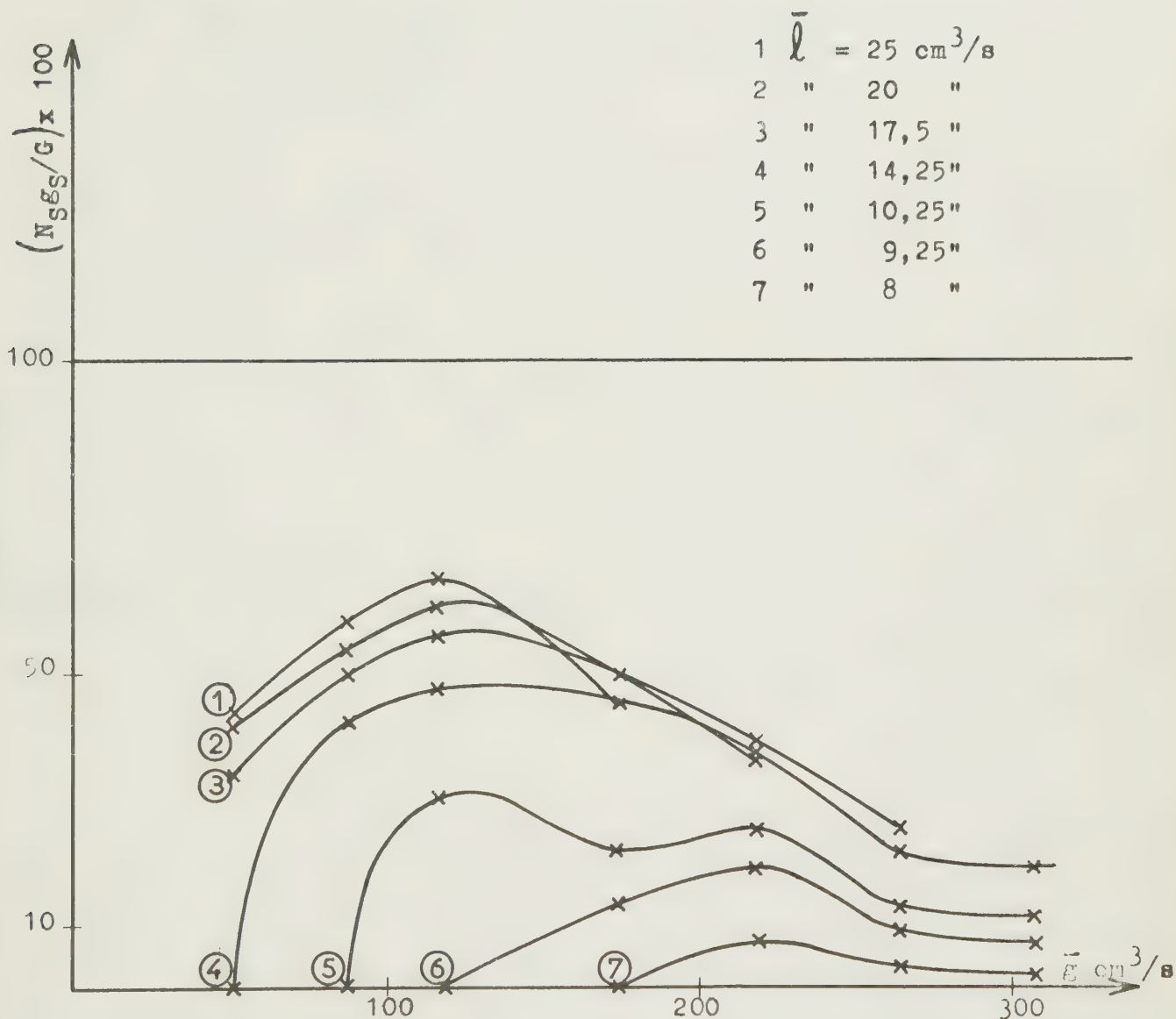
Graphique II.2421.4

VARIATIONS DU POURCENTAGE D'AIR S'ÉCOULANT
SANS ÊTRE EN CONTACT AVEC L'EAU, en FONCTION
DE $\Delta P / \rho_L \bar{g}_a Z$ à $\bar{g}$ CONSTANT



Graphique II.2421.5

VARIATIONS DU POURCENTAGE D'AIR S'ÉCOULANT
SANS ÊTRE EN CONTACT AVEC L'EAU, EN FONCTION
DU DÉBIT D'EAU l à $\bar{g}$ CONSTANT

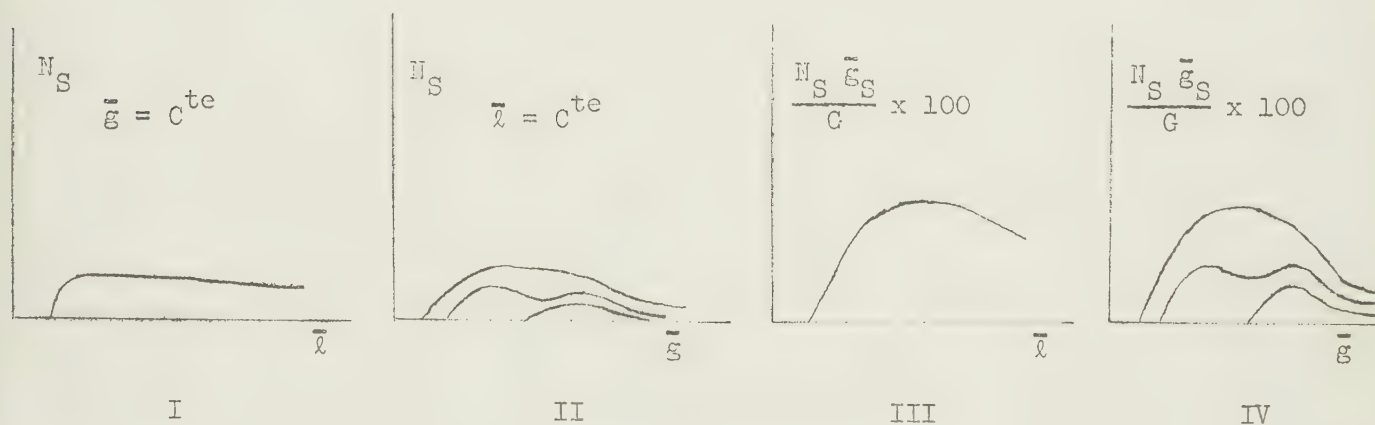


Graphique II.2421.6

VARIATIONS DU POURCENTAGE D'AIR, S'ÉCOULANT
SANS ÊTRE EN CONTACT AVEC L'EAU, EN FONCTION
DU DÉBIT D'AIR $\bar{g}$ à $\bar{l}$ CONSTANT

portées les variations de N_S et N_L et du pourcentage d'air s'écoulant dans les tubes secs en fonction de $\frac{\Delta P}{\rho_L \epsilon_a Z}$ à $\bar{g}$ constant, de $\bar{l}$ à $\bar{g}$ constant et de $\bar{g}$ à $\bar{l}$ constant.

Sur les schémas ci-dessous sont représentées les allures des courbes obtenues ; ils permettent de faire les remarques suivantes :



1) Dans tous les cas étudiés, le nombre N_S de tube-gaz secs reste faible ; sa valeur maximale obtenue représente moins de 7 % du nombre total de tubes du faisceau. Cette première constatation montre que, dans un faisceau de tubes, il suffit que quelques tubes seulement aient un fonctionnement différent du fonctionnement moyen de l'ensemble des tubes pour que les propriétés hydrodynamiques mesurées s'écartent considérablement des propriétés qui existeraient si tous les tubes fonctionnaient de la même façon.

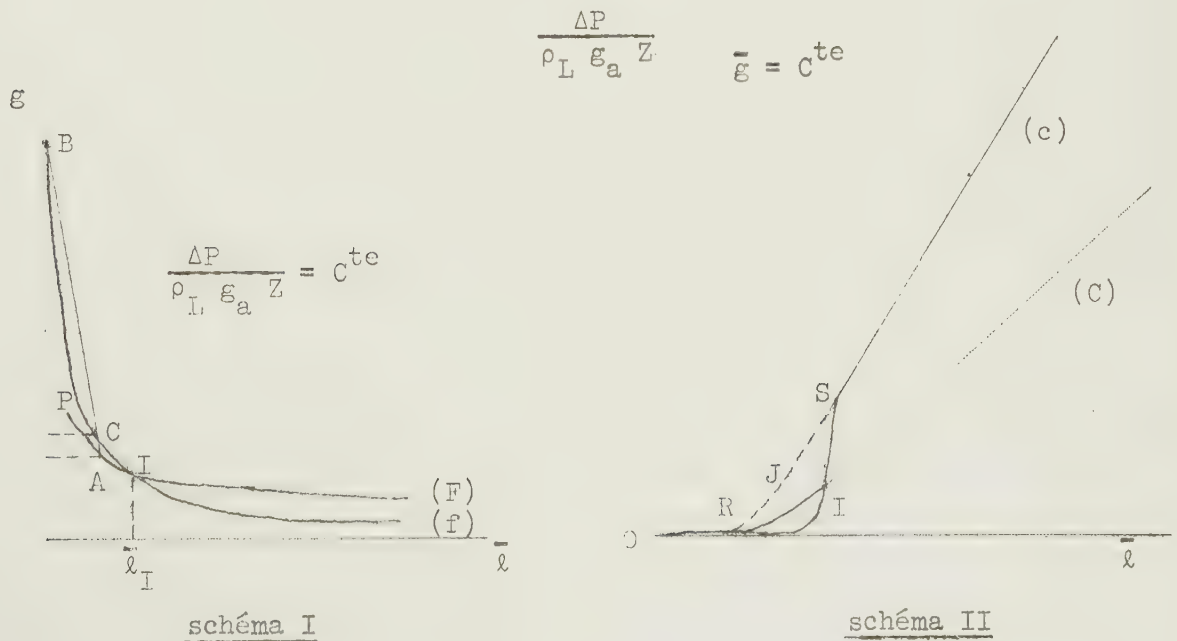
2) Par contre, le débit d'air s'écoulant sans être en contact avec l'eau peut représenter jusqu'à 65 % du débit d'air total s'écoulant à travers le faisceau.

3) Le nombre N_S de tube-gaz secs (schéma I) croît en fonction du débit d'eau $\bar{l}$ croissant, passe par un maximum puis décroît très lentement pour les fortes valeurs de $\bar{l}$. En fonction du débit d'air $\bar{g}$ croissant (schéma II), N_S croît, passe par un maximum et décroît très sensiblement pour les fortes valeurs de $\bar{g}$.

Le débit d'air s'écoulant dans les tube-gaz secs a, en fonction de $\bar{l}$ et $\bar{g}$, un sens de variation analogue à N_S .

Ainsi les résultats montrent que l'influence du processus d'écoulement séparé des phases sur le fonctionnement du faisceau de tubes diminue pour les fortes valeurs du débit d'air alors qu'elle reste très importante sur tout le domaine des débits d'eau considéré dans ce paragraphe.

II - 232 . 2 Domaine où $\delta \left(\frac{\Delta P}{\rho_L \varepsilon_a Z} \right)$ est négative.



On considère le schéma I, déjà présenté ci-dessus au paragraphe II.231, et le schéma II où sont portées la courbe (c) représentant la chute de pression de l'air en fonction du débit d'eau dans un seul tube et son homologue (C) obtenue avec le faisceau de tubes.

Dans le domaine étudié ici, la courbe (F) se situe dans la convexité de la courbe (f), portion IP de (F) ; tout point de IP se situe à l'extérieur du segment BC et ne peut en conséquence représenter le point d'addition des points B et C, les relations établies au paragraphe II.241 ne peuvent alors être vérifiées ; ceci signifie donc que dans ce domaine il n'est pas possible d'interpréter les propriétés hydrodynamiques du faisceau à partir des mesures faites sur un tube seul ou, qu'en d'autres termes, le fonctionnement d'un tube-gaz-liquide, monté dans un faisceau de tubes identiques est différent de celui d'un tube monté seul. On peut alors supposer que le fonctionnement des tube-gaz-liquide d'un faisceau soit tel que la variation de $\frac{\Delta P}{\rho_L g_a Z}$ en fonction de $\bar{L}$ (schéma II) soit représentée par RJS et non par RIS ; ceci revient à extrapoler la loi de variation de $\frac{\Delta P}{\rho_L g_a Z}$ en fonction de $\bar{L}$ obtenue pour l'écoulement d'un mélange gaz-liquide homogène dans le domaine des forts débits d'eau et à admettre que pour un tube-gaz-liquide monté dans un faisceau, il y a passage direct de l'écoulement annulaire à l'écoulement d'un mélange gaz-liquide homogène alors que pour un tube monté seul se produit l'écoulement pulsé.

A partir de cette hypothèse, il est possible d'appliquer la méthode établie au paragraphe II.241 pour interpréter les propriétés du faisceau dans le domaine considéré dans ce paragraphe.

II - 25 CONCLUSION.

L'étude de l'écoulement gaz-liquide à co-courant dans un tube seul a permis d'observer l'existence de trois types d'écoulement, d'en déterminer les domaines d'existence et de mesurer la chute de pression de l'air.

A l'aide de ces résultats, on a pu mesurer les écarts entre le fonctionnement réel d'un faisceau de tubes et le fonctionnement qui résulterait de la juxtaposition de tubes montés en parallèle et fonctionnant tous de la même façon. Les mesures de ces écarts ont permis de montrer à l'aide du modèle à tube-gaz secs et à tube-gaz-liquide que :

- même dans un écoulement à co-courant descendant, le fonctionnement d'un faisceau de tubes parallèles était contrôlé par l'écoulement séparé des phases ;

- le débit d'air s'écoulant dans les tube-gaz secs représentait un pourcentage important du débit d'air total alimentant le faisceau, même pour les forts débits d'eau ;

- l'interaction entre les tube-gaz-liquide se traduisait par la suppression de l'écoulement pulsé et son remplacement, dans le domaine où il existait pour un tube monté seul, par l'écoulement d'un mélange gaz-liquide homogène.

---:---:---:---:---:---:---

Références

- (1) D.J. NICKLIN and DAVIDSON J.F. - "Symposium on two Phase Flow" - Paper n° 4, Inst. Mech. Engrs. London - February 1962.
- (2) G.E. ALVES - Chem. Eng. Prog.- 50, 449 (1954).
- (3) O. BAKER - Oil Gas J. - July 26 (1954).
- (4) P. GRIFFITH and G.B. WALLIS - Trans. ASME (Am. Soc. Mech. Eng.) Ser. C 83 - 307. (1961).
- (5) G.W. GOVIER, B.A. RADFORD and J.S.C. DUNN - Can. J. Chme. Eng., 35, 58 (1957).
- (6) S. CALVERT et B. WILLIAMS - Aiche Journal - 1, 78 (1955).
- (7) G.H. ANDERSON et B.G. MANTZOURANIS - Chem. Eng. Sci. - 12, 1960 (1960).
- (8) J.G. COLLIER et G.F. HEWITT - Trans. Inst. Chem. Engrs (London) 39, 127 (1961).
- (9) ZHIVAIKIN L. Ya - Int. Chem. Eng. - 2, 337 (1962).
- (10) HIDEO FUJIE - Am. Inst. Chem. Engrs - Journal 10 (2) (1964) 227-32.
- (11) G.F. HEWITT, I. KING and P.C. LOVEGROVE - Brit. Chem. Eng. 8, (1963) 311-18.
- (12) A.D.K. LAIRD - Trans. Am. Soc. Mech. Engrs. 76 (1954) 1005-10.
- (13) I.S. KAMEI, O.J. OISHI et autres - Chem. Eng. Jap. - 18 (1954) 545-42.
- (14) L. FRIED - Chem. Eng. Prog. Symp. Ser. - 9 (1954) 47.
- (15) R.P. STEIN et autres - Chem. Eng. Prog. Symp. Ser - 11 (1954) 115-26.
- (16) E. KNUTH - Jet. Prop. - 24 (1954) 359-65.
- (17) P. GRIFFITH et G.B. WALLIS - Trans. ASME (Am. Soc. Mech. Eng) Ser C 83, 307 (1961).

- (18) D.J. NICKLIN, J.O. WILKES and J.F. DAVIDSON - Trans. Inst. Chem. Engrs - 40-61 (1962).
- (19) R. MOISSIS et P. GRIFFITH - Trans. ASME (Am. Soc. Mech. Engrs) Ser. C 84, 29, (1962).
- (20) L. LAPIDUS - Ind. Eng. Chem. - 49 (1957) 1000.
- (21) F.H. BRINKMAN et C.F. WEINAUG - Am. Inst. Chem. Engrs Jour. 3 (1957) 29.
- (22) G. MARUCCI, F. GIOIA - Chim. Ind. (Milan) 45 (10) (1963) 1205-11.
- (23) J.R. STREET - "A Study of Vertical Gas-Liquid Slug Flow" Ph. D. Thesis, University of Michigan (1962).
- (24) E.S. KORDYBAN - Trans. ASME (Am. Soc. Mech. Eng.) Ser. D 83, 613 (1961).
- (25) O.P. BERGELIN et C. GAZLEY - Proc. Heat Trans. Fluid Mech. Inst. Am. Soc. Mech. Engrs. (1949).
- (26) C. GAZLEY - Proc. Heat Transfer Fluid Mech. Inst. ASME (1949).
- (27) S.G. BANKOFF - Jour. Heat Transf. Nov. (1960) 265.
- (28) R.W. LOCKHART et R.C. MARTINELLI - Chem. Eng. Prog. 45 (1949) 39.
- (29) R.C. MARTINELLI, L.M.K. BOELTER, T.H.M. TAYLOR, E.G. THOMSEN et E.H. MORRIN - Trans. Am. Soc. Min. Engrs - 66 (1944) 139.
- (30) R.C. MARTINELLI, J.A. PUTNAM et R.W. LOCKHART - Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. 42 (1946) 681.
- (31) D. CHISOLM et A.D.K. LAIRD - Trans. Am. Soc. Met. Engrs 80 (1958) 276.
- (32) G.A. HUGHMARK - Ind. Eng. Chem. Fundamentals 2 (4) 1963, 315, 21.
- (33) A.E. DUKLER, MOYE WICKS et R.G. CLEVELAND - Am. Inst. Chem. Engrs Jour. 10 n° 1 (1964) 38 et 44.
- (34) C.J. HOOGENDORN - Chem. Eng. Sci.- 9 (1959) 205.
- (35) J.M. CHEVOWETH et M.W. MARTIN - Petr. Ref. - 34, n° 10 (1955) 151.

- (36) G.A. HUGHMARK et B.S. PRESSBURG - Am. Inst. Chem. Engrs. Jour.
7 (1961) 677.
- (37) S. LEVY - Jour. Heat Trans. - Mai (1960) 113 et Mai (1963) 137.
- (38) J.F. MARCHATERRE - Jour. Heat Trans. - Nov. (1961) 503.
- (39) R.A.S. BROWN et G.A. SULLIVAN et G.W. GOVIER - Can. Jour. Chem.
Eng. 38 (1960) 62.
- (40) R.A.S. BROWN et G.W. GOVIER - Can. Jour. Chem. Eng. 39 (1961)
159.
- (41) G.W. GOVIER et M.M. OMER - Can. Jour. Chem. Eng. 40 (1962) 93.
- (42) G.W. GOVIER, B.A. RADFORD et S.C. DUNN - Can. Jour. Chem. Eng.
35 (1957) 59.
- (43) G.W. GOVIER et W.L. SHORT - Can. Jour. Chem. Eng. 36 (1958) 195.
- (44) A.F. BERTUZZI, M.R. TEK et POETTMANN F.H. - Jour. Petr. Tech.
8 (1956) 17.
- (45) W.E. BRIGHAM, E.D. HOLSTEIN et R.L. HUNTINGTON - Petr. Eng. 29,
n° 12 (1957) D. 39.
- (46) N.C.J. ROS - Paper presented at AICHE Meeting, Tulsa, sept.
(1960) 25-28.
- (47) P.G. NASSOS - Argonne national Laboratory - Juin 1963.
- (48) L.G. NEAL et S.G. BANKOFF - Am. Inst. Chem. Engrs. Jour.
Juillet (1963) 490.

-:~::~~::~~::~~:-

TROISIEME PARTIE

COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS DANS UN GARNISSAGE D'ANNEAUX
RASCHIG ET DE CEUX OBTENUS DANS UN FAISCEAU DE TUBES PARALLELES

--:--:--:--:--

III - 1 RECHERCHE D'UN CRITERE D'EQUIVALENCE DU GARNISSAGE ET DU FAISCEAU DE TUBES.

Pour établir les lois de pertes de pression dans les milieux poreux, on a l'habitude d'assimiler ce milieu à un modèle géométriquement plus simple.

Le modèle de KOZENY, le plus fréquemment utilisé est constitué d'un faisceau de pores cylindriques équivalents non interconnectés. Soit Z l'épaisseur de la couche poreuse placée dans un fût de section A_0 ; V est le volume de cette couche et S l'aire d'interface contenue dans le volume V . Les aires volumiques de lit et de grain sont :

$$s_C = \frac{S}{V} \quad \text{et} \quad s_g = \frac{S}{V(1-\epsilon)}$$

ϵ est la porosité du lit.

Le volume poreux est assimilé à un faisceau de N_p pores indépendants de diamètre d_p et de longueur Z_p ; le rapport $T = Z_p/Z$ est appelé "facteur de tortuosité".

N_p et d_p sont calculés pour que le modèle ait la même surface spécifique que le lit réel ; on a ainsi :

$$d_p = \frac{4 \epsilon}{s_g (1 - \epsilon)}$$

$$N_p = A_0 \frac{s_g^2 (1 - \epsilon)^2}{4 \pi T \epsilon}$$

Dans le cas du garnissage d'anneaux Raschig utilisé par B. LESPINASSE (1), on trouve les valeurs numériques suivantes :

$$\begin{aligned} d_p &= 6,25 \text{ mm} \\ N_p &= 370 \end{aligned}$$

Nous préférons opérer autrement, c'est-à-dire fixer a priori d_p égal à 6,5 mm et calculer le nombre N_p de pores équivalents pour que la chute de pression de l'air soit la même dans le milieu poreux et dans le faisceau de pores secs (ceci sous-entend qu'une partie du milieu poreux où ne s'écoule pas de fluide n'est pas comptée).

On trouve alors $N_p = 62$.

En utilisant ce dernier modèle on compare les résultats obtenus par B. LESPINASSE et par C. PROST pour les écoulements d'air et d'eau à contre-courant et à co-courant aux résultats obtenus dans ce présent travail. Cette comparaison restera qualitative ; l'interprétation des propriétés du garnissage à l'aide de celles du faisceau ne pourra être vérifiée quantitativement, l'influence du diamètre des pores, de leur inclinaison, le rôle de leur interconnection n'ayant pas été étudiés.

III - 2 PRESENTATION DES RESULTATS.

Pour comparer les résultats obtenus avec un garnissage et ceux obtenus avec un faisceau de tubes, on considère les variations de $\Delta P / \rho_L g_a Z$ en fonction de $\bar{g}$, celles du rapport $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$ en fonction de $\bar{l}$ (ΔP_0 est la chute de pression de l'air dans le garnissage sec, dans le faisceau et dans un tube secs) et le diagramme des couples $(\bar{l}, \bar{g})$ pour lesquels l'air subit une même chute de pression.

III - 3 COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS POUR L'ECOULEMENT A CONTRE-COURANT.

Avant de comparer les résultats il est nécessaire de faire les remarques suivantes :

1) Dans le cas d'un garnissage, l'étude des variations des grandeurs hydrodynamiques a été faite à débit d'air croissant et à débit d'eau constant alors que dans le cas du faisceau de tubes, les expériences ont été faites à débit d'eau croissant ou décroissant et à débit d'air constant.

2) Dans le cas d'un garnissage, pour toutes les expériences effectuées par B. LESPINASSE (1) et par C. PROST (2), les opérations (qui pourraient être représentées sur un diagramme (L,G) par un chemin fléché) précédant l'établissement des conditions initiales de fonctionnement sont les suivantes :

- le système est placé dans un état d'engorgement visible.
- le débit d'air est annulé.
- on règle le débit d'eau à la valeur qu'on veut étudier.
- on mesure alors les variations des grandeurs hydrodynamiques en fonction du débit d'air croissant à débit d'eau constant.

Sans étudier systématiquement l'influence sur les grandeurs mesurées du chemin suivi pour atteindre un point (L,G) les auteurs précédemment cités ont observé que, pour des chemins différents, les résultats obtenus étaient quelque peu différents.

Rappelons que dans le cas d'un faisceau, l'influence du chemin suivi pour établir des conditions de fonctionnement (L,G) donnée est tellement importante que nous avons été conduits à étudier

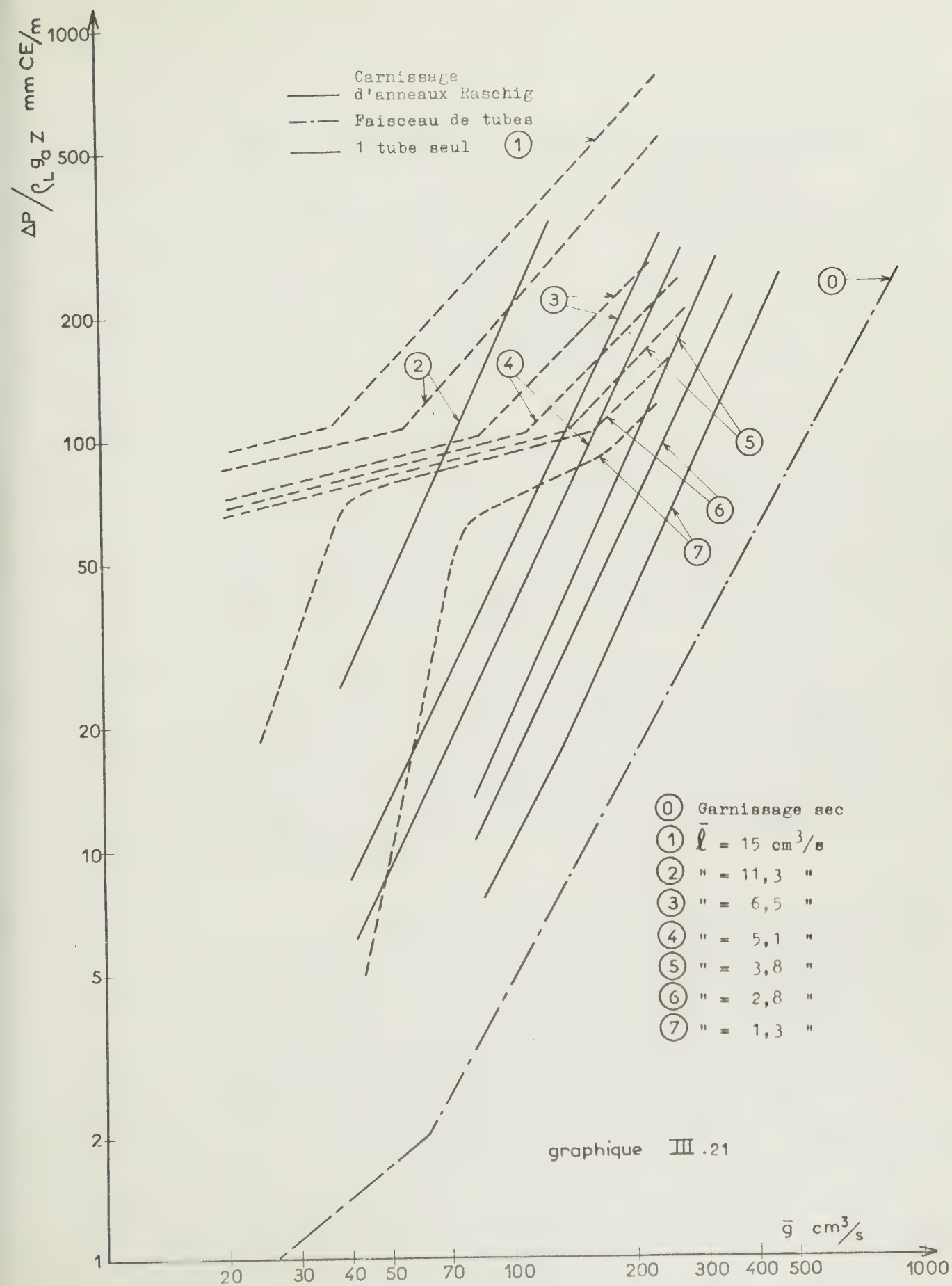
les propriétés du faisceau pour deux types de fonctionnement très différents, ces propriétés étant dans les deux cas et pour un large domaine, contrôlées par le processus d'écoulement séparé des phases. Il est de plus à remarquer que l'influence du chemin suivi sur l'état où se trouve le faisceau pour des conditions (L, G) données résulte de la ségrégation des phases, on peut penser qu'il en est de même dans un garnissage et que le processus d'écoulement séparé du gaz et du liquide intervient également dans la détermination de l'état où se trouve un garnissage pour des conditions (L, G) données.

3) Les études classiques des propriétés des colonnes à film tombant montrent que dans un écoulement d'un film ruisselant et d'un contre-courant central d'air, la chute de pression maximale de l'air (lorsque le film liquide est refoulé) reste toujours inférieure à 10 mm CE/m ; or les chutes de pression de l'air dans un garnissage sont généralement supérieures à cette valeur.

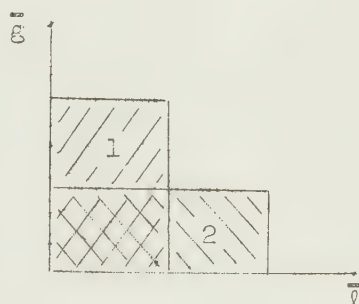
III.31 Variations de $\Delta P / \rho_L g_a Z$ en fonction de $\bar{g}$.

Sur le graphique III.31 on porte en doubles coordonnées logarithmiques, les variations de la chute de pression de l'air à travers le garnissage $(\Delta P / \rho_L g_a Z)_R$ d'après B. LESPINASSE (1) et à travers le faisceau de tubes pour les fonctionnements irréversibles $(\Delta P / \rho_L g_a Z)_f$ en fonction de $\bar{g}$ pour différentes valeurs de $\bar{l}$; on porte également les résultats relatifs au cas du garnissage sec qui sont, par définition, les mêmes que pour le faisceau de tubes sec. On peut faire les remarques suivantes :

1) comme le montre le schéma ci-dessous, les domaines de fonctionnement moyen $(\bar{l}, \bar{g})$ d'un pore du garnissage (domaine 1) et d'un



tube du faisceau (domaine 2) ont une large partie commune.



2) Il existe plusieurs lois de variations de $(\Delta P / \rho_L g_a Z)_f$ en fonction de $\bar{g}$ alors que les variations de $\log (\Delta P / \rho_L g_a Z)_R$ en fonction de $\log \bar{g}$ sont représentées par une seule droite ; d'autre part, pour $\Delta P / \rho_L g_a Z$ inférieure à 200 mm CE/m la chute de pression dans le garnissage est inférieure à celle dans le faisceau de tubes alors qu'elle lui est supérieure au-delà de 200 mm CE/m.

Pour interpréter ces résultats on rappellera que dans le cas du faisceau la variation de $(\Delta P / \rho_L g_a Z)_f$ est déterminée d'une part par la variation du nombre de tube-gaz et d'autre part par l'existence de différents états de ces tube-gaz ; ces deux facteurs dépendent de l'état initial du système et des chemins suivis sur le diagramme $(\bar{l}, \bar{g})$.

Le fait qu'il y ait une seule droite pour un garnissage peut signifier qu'il n'existe qu'une seule catégorie de "pore-gaz" qui seraient des "pore-gaz" secs puisque les expériences ont été réalisées avec introduction du liquide avant introduction du gaz et augmentation progressive de $\bar{g}$ et que ce chemin conduit à un nombre minimal de "pore-gaz" donc à des "pore-gaz" secs.

Tout se passe comme si, pour $\Delta P / \rho_L g_a Z < 200$ mm CE/m, le

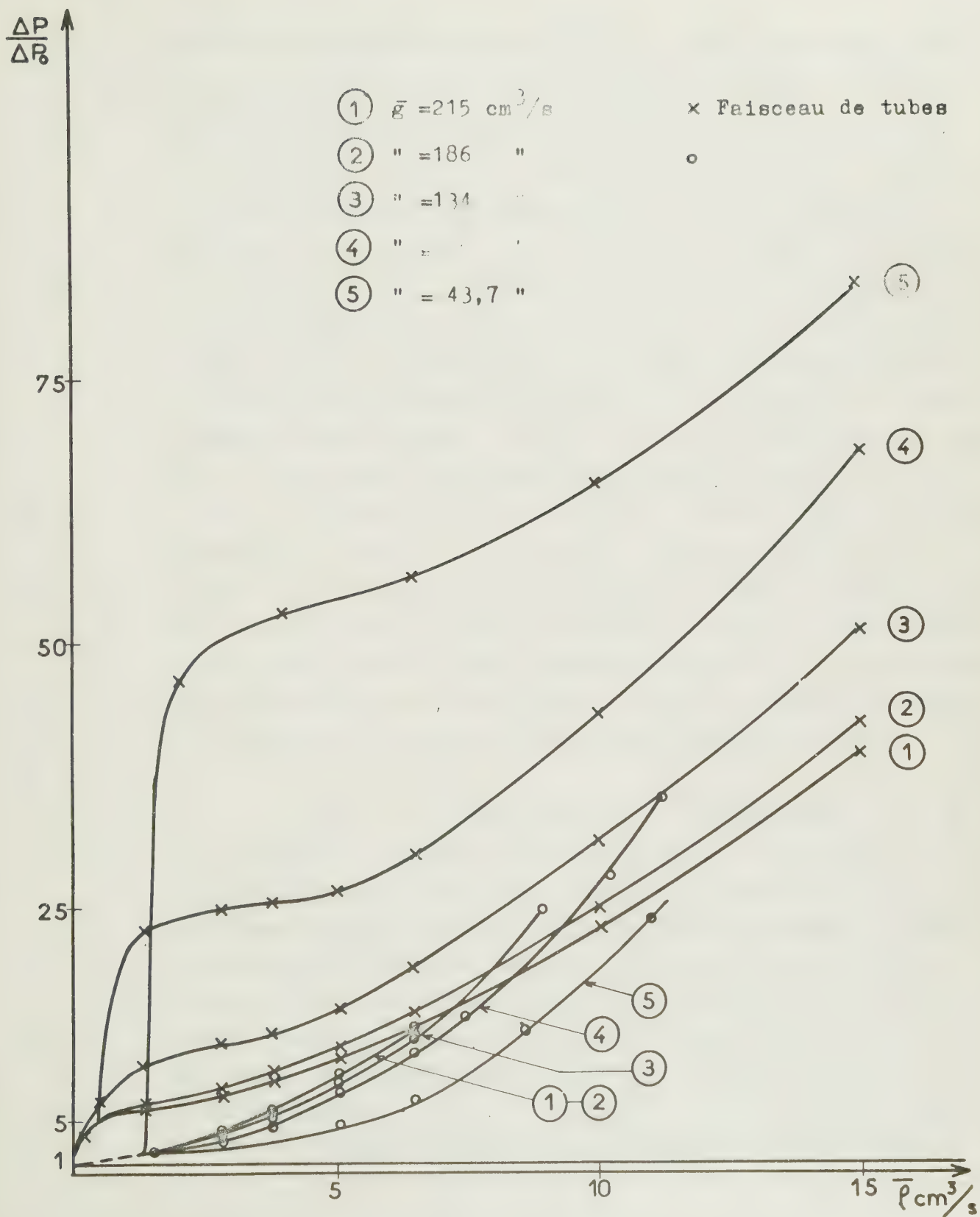
gaz circulait plus facilement dans le garnissage que dans le faisceau de tubes. Par exemple, pour $\bar{l} = 2,8 \text{ cm}^3/\text{s}$ et $\bar{g} = 100 \text{ cm}^3/\text{s}$, la chute de pression est 9 fois plus petite dans le garnissage que dans le faisceau de tubes ; ceci signifierait que le nombre relatif de "tube-gaz" secs est neuf fois plus grand dans le garnissage que dans le faisceau de tubes. A la vérité ceci doit résulter de l'interconnexion des pores dans le garnissage : les écoulements de gaz suivent des chemins tortueux en contournant les zones occupées par des bouchons liquides alors que ce phénomène n'existe évidemment pas dans le cas du faisceau de tubes.

On aurait pu croire a priori que la tortuosité des chemins de gaz dans le garnissage aurait provoqué un accroissement de la chute de pression en favorisant les points de rencontre du gaz et du liquide et, par conséquent, les dégradations d'énergie mécanique par "chocs" des deux écoulements de gaz et de liquide à contre-courant. Nous constatons donc qu'il n'en est rien ou plus précisément que ce phénomène est masqué par un fait plus important : l'interconnexion du volume poreux favorise la ségrégation des phases, le gaz utilise "au mieux" le volume laissé disponible par le liquide et cet effet l'emporte sur l'augmentation de perte de pression qui résulterait de la tortuosité des filets de gaz.

Par contre, il semble que les fortes chutes de pression ($\Delta P/\rho_L g_a Z > 200 \text{ mm CE/m}$) chassent plus facilement les bouchons de liquide dans le faisceau de tubes que dans le garnissage.

III.32 Variations de $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$ en fonction de $\bar{l}$.

Sur le graphique III.32 on porte les variations de $\left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0} \right)_f$



Graphique III.22

pour le faisceau de tubes et de $\left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0}\right)_R$ pour le garnissage d'anneaux Raschig en fonction de $\bar{l}$ pour différentes valeurs de $\bar{g}$. Dans un modèle d'écoulement séparé du gaz et du liquide, les variations du rapport $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$ caractérisent les variations du nombre de "pore-gaz". La position relative d'une courbe $\left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0}\right)_f$ et d'une courbe $\left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0}\right)_R$ ainsi que l'allure de ces courbes confirment les résultats précédents. Il est particulièrement significatif de comparer par exemple les deux courbes correspondant au même débit de gaz $\bar{g} = 43,7 \text{ cm}^3/\text{s}$ (courbes portant le n°5) : alors que pour le garnissage la chute de pression est une fonction croissante monotone de $\bar{l}$ (par exemple ΔP a seulement quadruplé quand $\bar{l}$ atteint $5 \text{ cm}^3/\text{s}$), la chute de pression dans le faisceau de tubes passe brusquement à une valeur de l'ordre de 50 fois la valeur à sec dès que $\bar{l}$ atteint environ $2 \text{ cm}^3/\text{s}$ et $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$ est égal à 60 pour la valeur $\bar{l} = 5 \text{ cm}^3/\text{s}$ citée ci-dessus. Nous avons vu au chapitre I.323.3 que, dans ces conditions, le nombre de tube-gaz secs est très petit, soit 10 tubes : seule la fraction 8 % du nombre total de tubes est disponible pour l'écoulement du gaz. Tout se passe comme si, au contraire, dans le garnissage, environ la moitié du nombre total de pores était encore utilisée pour l'écoulement du gaz.

De plus, on constate que pour une valeur donnée de $\bar{l}$, $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$ est une fonction lentement croissante de $\bar{g}$ pour le garnissage et une fonction rapidement décroissante de $\bar{g}$ pour le faisceau de tubes. Ces résultats viennent confirmer nos conclusions du paragraphe précédent : l'augmentation du débit de gaz dans le faisceau de tubes chasse les bouchons de liquide et rend disponible un plus grand nombre de tubes pour l'écoulement du gaz, au contraire, l'augmentation du débit de gaz dans le garnissage n'augmenterait pas le nombre de pore-gaz qui était déjà grand ; ce facteur révélerait l'influence des interactions du gaz et du liquide aux points de rencontre de ces écoulements.

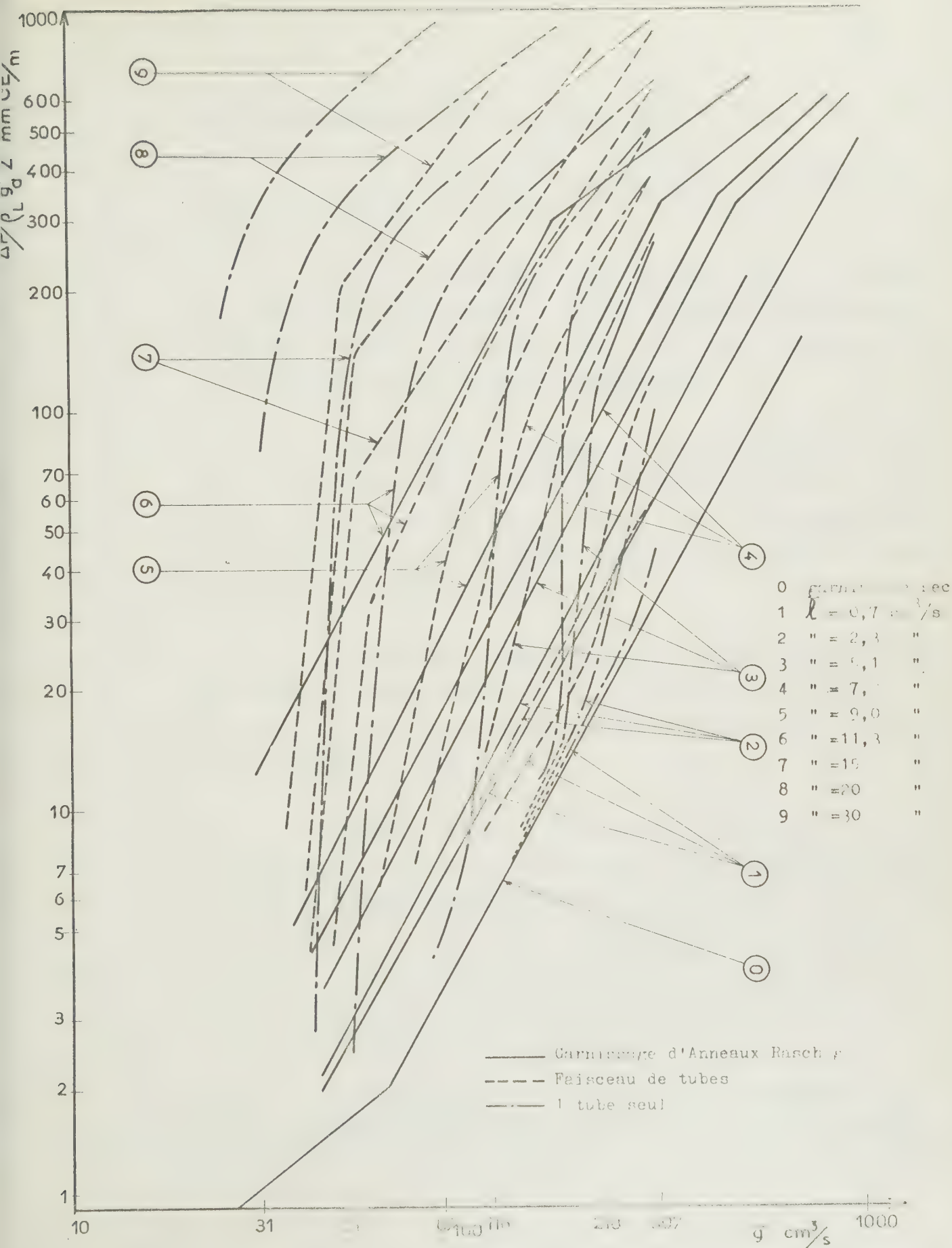
III - 4 COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS POUR L'ÉCOULEMENT A CO-COURANT.

III.41 Variations de $\Delta P / \rho_L g_a Z$ en fonction de $\bar{g}$.

Sur le graphique III.41 on porte les variations de $\Delta P / \rho_L g_a Z$ en fonction de $\bar{g}$ pour différentes valeurs de $\bar{l}$ dans le cas d'un garnissage, d'un faisceau de tubes et d'un tube seul.

On constate que, de même qu'à contre-courant, les domaines de fonctionnement $(\bar{l}, \bar{g})$ d'un pore du garnissage et d'un tube du faisceau ont une large partie commune.

Rappelons qu'on a montré dans la deuxième partie de ce travail que la variation de $(\Delta P / \rho_L g_a Z)_f$ était déterminée par les lois de l'écoulement gaz-liquide à co-courant dans un tube et aussi par le processus de ségrégation des phases, l'influence de ce dernier facteur n'intervenant qu'à l'apparition de l'écoulement par pistons ou de l'écoulement (pulsé ou non) d'une émulsion gaz-liquide qui se traduit par une augmentation brusque de la chute de pression de l'air. Or ce changement brusque de la variation de $\Delta P / \rho_L g_a Z$ n'existe pas dans le cas d'un garnissage ; ce résultat peut être interprété en admettant que même pour de faibles valeurs de $\bar{l}$ et $\bar{g}$ l'écoulement annulaire n'existe pas et que, le phénomène de ségrégation intervenant, le garnissage comprend des "pore-liquide" où existe l'écoulement par pistons et des "pore-gaz" secs. Le changement de loi de variations de $(\Delta P / \rho_L g_a Z)_R$ observé pour les fortes valeurs de $\bar{g}$ correspondrait alors au passage de l'écoulement par pistons, à l'écoulement (pulsé ou non) d'une émulsion gaz-liquide dans les "pore-liquide".



III.42 Variations de $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$ en fonction de $\bar{L}$.

Les variations de $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$ en fonction de $\bar{L}$ sont données sur le graphique III.42.

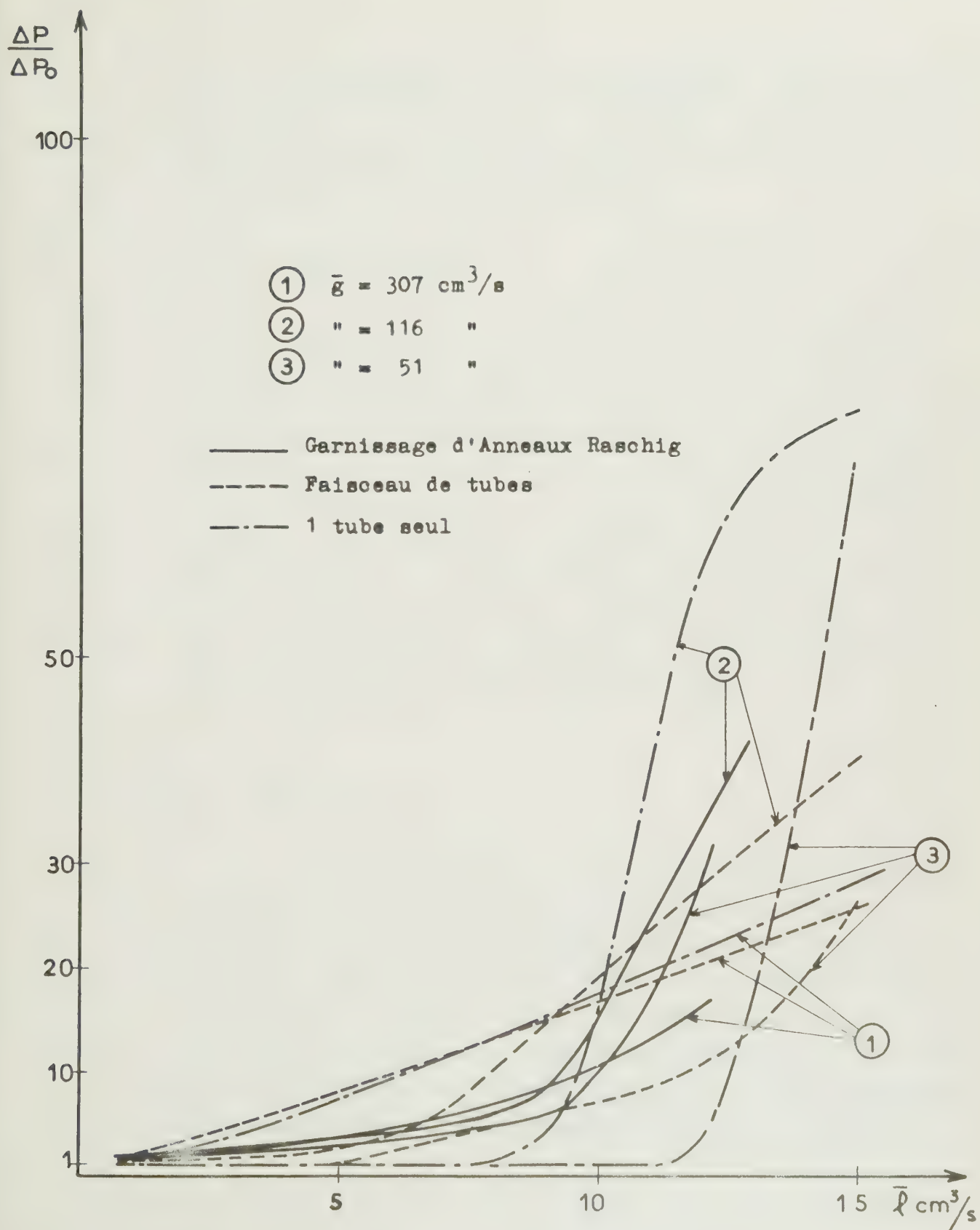
Pour les forts débits de gaz ($\bar{g} = 307 \text{ cm}^3/\text{s}$), les chutes de pression dans le tube seul et dans le faisceau de tubes varient d'une façon monotone identique, tandis que la chute de pression dans le garnissage est systématiquement plus petite.

Pour les faibles débits de gaz au contraire ($\bar{g} = 51 \text{ cm}^3/\text{s}$) les trois rapports $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$ n'augmentent d'abord que lentement avec $\bar{L}$ puis très rapidement vers $\bar{L} \approx 10 \text{ cm}^3/\text{s}$; la chute de pression dans le garnissage étant systématiquement plus grande que dans le tube seul et dans le faisceau de tubes.

L'influence du débit de gaz sur la chute de pression relative $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$ est donc apparemment très différente de celle dans le cas du contre-courant, mais l'interprétation fait encore appel au phénomène de ségrégation des phases.

Aux faibles débits de gaz, la chute de pression est faible et le liquide, se déplaçant principalement sous l'influence de la gravité, entraîne des bulles de gaz tout au moins dans le cas du tube et du faisceau de tubes ; mais ce phénomène n'existe pratiquement pas dans le cas du garnissage, la force motrice (c'est-à-dire la chute de pression de l'air) pour assurer le même débit de gaz doit donc être plus grande dans le cas du garnissage.

Au contraire, aux forts débits de gaz c'est-à-dire aux fortes chutes de pression, c'est l'écoulement du gaz qui entraîne,



Graphique III.32

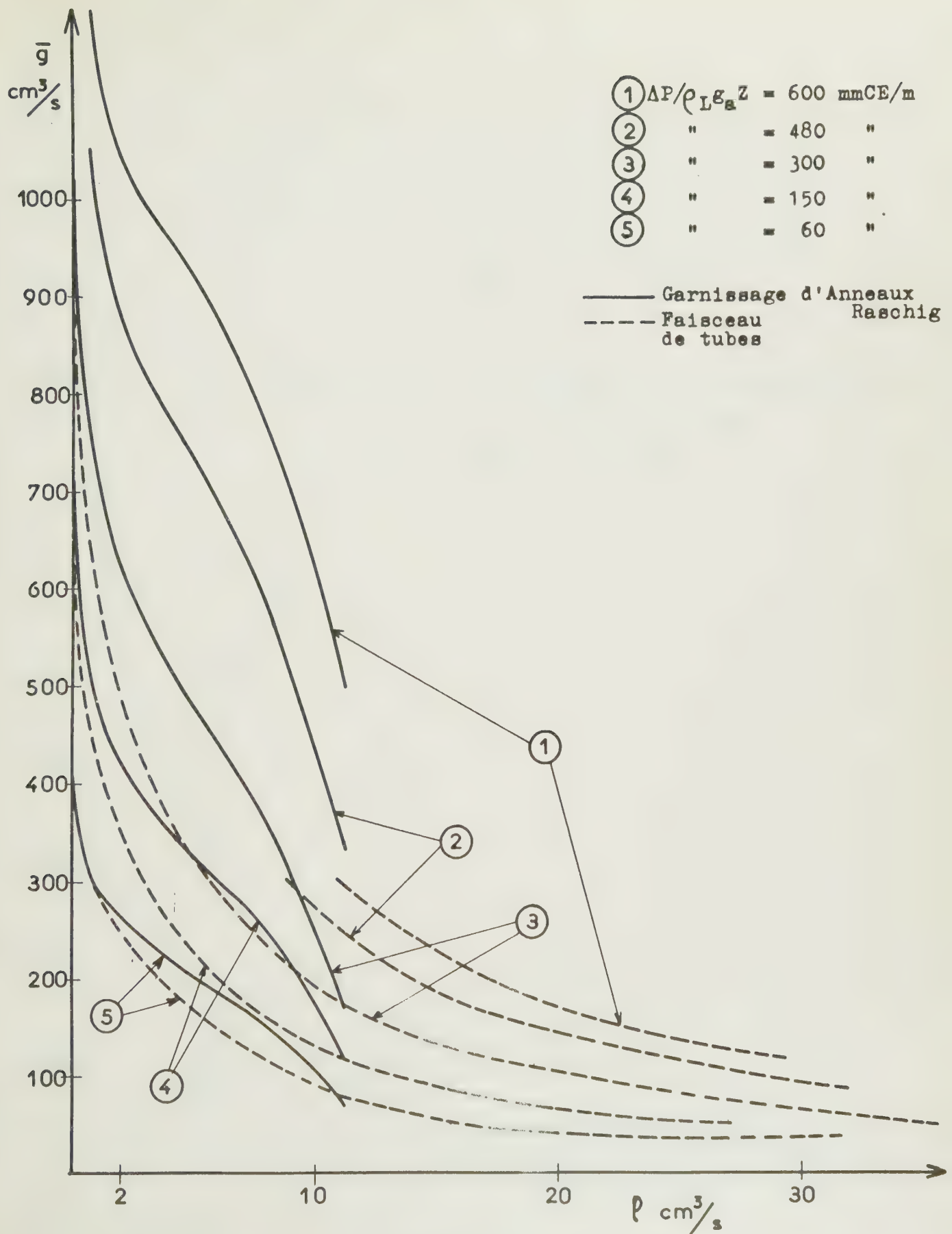
en partie, du liquide sous forme de gouttelettes. Les présents résultats montrent que la formation de cette émulsion consomme moins d'énergie dans le cas du garnissage tortueux que dans celui des tubes lisses, ce qui est assez vraisemblable.

III.43 Diagramme $(\bar{l}, \bar{g})$.

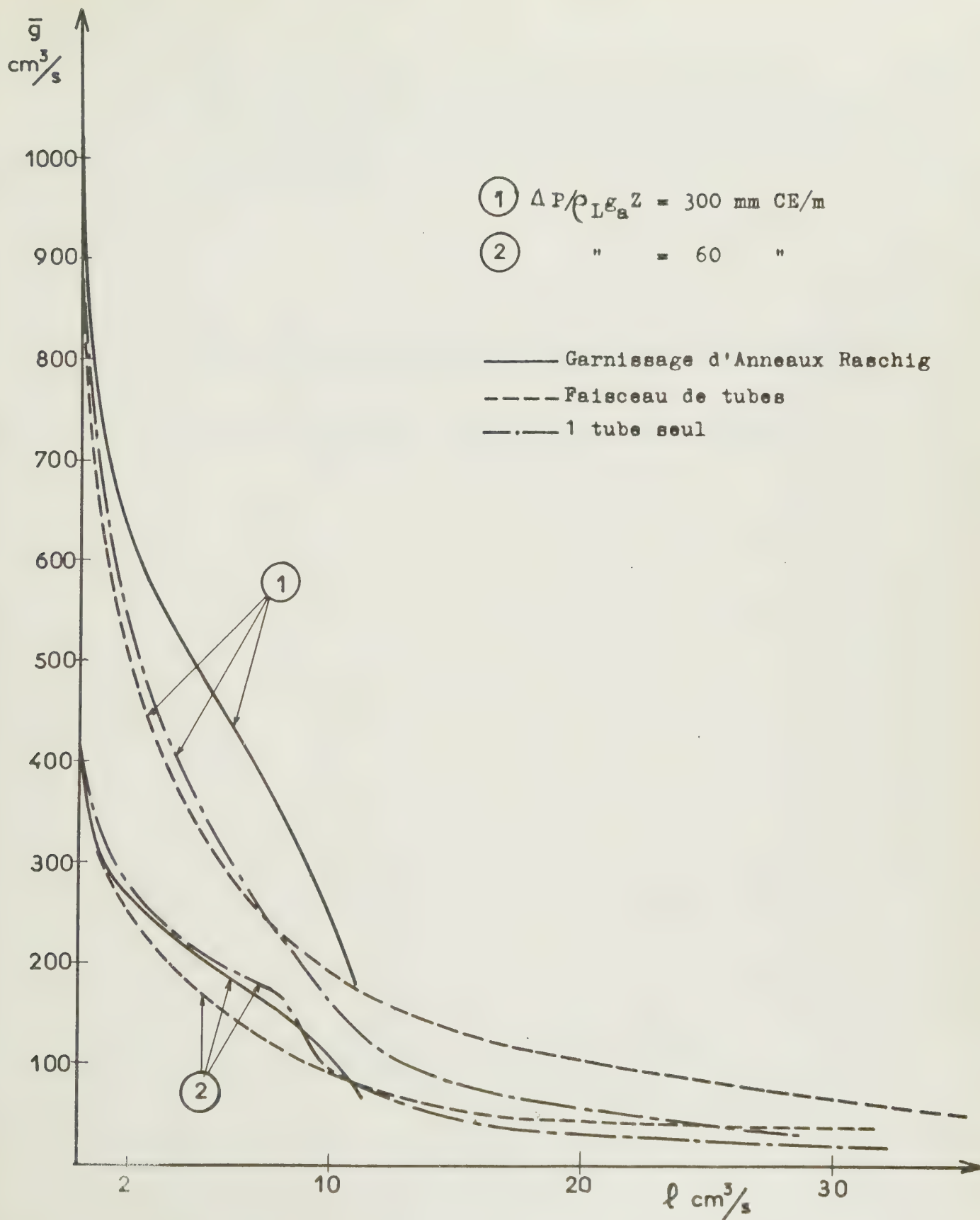
On porte sur le graphique III.44 les couples $(\bar{l}, \bar{g})$ pour lesquels l'air subit une même chute de pression dans un tube, dans un faisceau de tubes et dans un garnissage. Il serait en principe possible à l'aide de ce diagramme de calculer le nombre de "pore-gaz" secs et le nombre de "pore-liquide" en appliquant la même méthode de calcul que celle utilisée pour un faisceau de tubes dans la deuxième partie de ce travail. Ce calcul présenterait toutefois un caractère assez artificiel et nous ne le ferons pas. La position relative des courbes homologues obtenues dans les trois cas semble montrer que l'influence du processus de ségrégation des phases est plus marqué pour un garnissage que pour un faisceau de tubes.

III - 5 CONCLUSION.

La comparaison qualitative des résultats obtenus pour un garnissage et pour un faisceau de tubes laisse prévoir d'une part que le processus d'écoulement séparé des phases mis en évidence dans ce travail aussi bien pour l'écoulement à contre-courant que pour l'écoulement à co-courant de gaz et de liquide dans un faisceau de tubes joue un rôle important dans le fonctionnement d'un garnissage d'anneaux Raschig et que, d'autre part, dans le cas de l'écoulement à co-courant surtout, le garnissage à "faisceau de tubes parallèles"



Graphique III.33



Graphique III.34

serait peut-être plus intéressant que le garnissage d'anneaux Raschig. Pour vérifier cette hypothèse, il conviendrait de compléter le présent travail par une étude analogue du transfert de matière entre le gaz et le liquide.

- (1) B. LESPINASSE - Thèse de Doctorat es-Sciences Physiques -
Université de Nancy (1962).
- (2) C. PROST - Thèse de Doctorat es-Sciences Physiques -
Université de Nancy (1965).

-:-:-:-:-

Notations

d : diamètre d'un tube cm.
 g : débit d'air dans un tube seul cm^3/s
 $\bar{g}$: débit d'air moyen dans un tube du faisceau cm^3/s
 g_a : accélération de la pesanteur cm/s^2
 G : débit d'air dans le faisceau de tubes cm^3/s
 ℓ : débit d'eau dans un tube seul cm^3/s
 $\bar{\ell}$: débit d'eau moyen dans un tube du faisceau cm^3/s
 L : débit d'eau dans le faisceau de tubes cm^3/s
 N : nombre de tubes
 $\Delta P / \rho_L g_a Z$: chute de pression de l'air mm CE/m
 Z : longueur d'un tube
 β : retenue liquide du faisceau de tubes
 η : viscosité dynamique poise
 ρ : masse volumique g/cm^3
 g_e : débit d'air entraîné dans un tube liquide
 A : aire de la section d'un tube cm^2

Indices

B : tube à l'état de "Bullage"
 f : faisceau de tubes
 F : tube avec film d'eau et contre-courant central d'air
 G : tube-gaz
 L : tube-liquide
 M : tube-gaz mouillé
 PM : tube-gaz partiellement mouillé
 R : garnissage d'anneaux Raschig.

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : ETUDE DE L'ÉCOULEMENT GAZ-LIQUIDE A CONTRE-COURANT DANS UN FAISCEAU DE TUBES MONTES EN PARALLELE.	
<u>Chapitre I.1</u> : ETUDE DE L'ÉCOULEMENT GAZ-LIQUIDE A CONTRE-COURANT DANS UN TUBE SEUL	3
I.11 Etude bibliographique	3
<u>I.111</u> Etudes classiques des colonnes à film tombant	4
I.111.1 Etude de l'épaisseur moyenne de film	5
I.111.2 Influence du film tombant sur l'écoulement du gaz	7
I.111.3 Limite de refoulement du film ruisselant	7
I.111.4 Conclusion	10
<u>I.112</u> Etudes des propriétés locales d'un film ruisselant .	10
<u>I.113</u> Etudes des critères de stabilité de l'écoulement annulaire	12
<u>I.114</u> Conclusion	21
I.12 Dispositif expérimental	21
<u>I.121</u> Choix des dimensions et de la forme des extrémités du tube	21
<u>I.122</u> Description du dispositif expérimental	24
I.13 Résultats expérimentaux	25
<u>I.131</u> Diagramme des différents états pris par le système .	26
I.131.1 Domaine n°I : Ecoulement continu d'un film ridé et d'un contre-courant central de gaz	27
I.131.2 Domaine n°II : Ecoulement périodique de pistons de liquide et de bulles de gaz	29

	<u>Page</u>
I.131.3 Domaine n°III : Accumulation de liquide dans le pot supérieur	31
I.131.4 Domaine n°IV : "Bullage"	31
I.131.5 Domaine n°V : Ecoulement continu de filet de liquide lisse et de contre-courant dans la partie libre du tube	32
I.131.6 Conclusion	33
<u>I.132</u> Etude de l'écoulement d'air dans un tube parfaitement mouillé	33
<u>I.133</u> Etude de l'entraînement d'air par un écoulement d'eau dans un tube	36
I.133.1 Mesure du débit d'air entraîné g_c	36
I.133.2 Calcul de la fraction de volume β_L occupée par le liquide	39
I.133.3 Calcul de la charge correspondant à la colonne formée de pistons de liquide et de bulles d'air	40
<u>I.134</u> Etude des chutes de pression subies par l'air dans les différents états pris par le système	41
I.134.1 Chute de pression de l'air dans un tube sec ..	43
I.134.2 Chute de pression de l'air dans un tube sec avec une couche d'eau au-dessus du sommet du tube	43
I.134.3 Chute de pression de l'air dans un tube partiellement mouillé	44
I.134.4 Chute de pression de l'air dans un tube parfaitement mouillé	45
I.134.5 Chute de pression de l'air dans le domaine IV	47
I.134.6 Chute de pression de l'air dans le domaine d'écoulement continu d'un film ridé et d'un contre-courant central d'air	48
I.134.7 Résumé	48
I.14 Conclusion : Présentation d'un diagramme général	50
Liste des références bibliographiques	
<u>Chapitre I.2</u> ETUDE DE L'ECOULEMENT GAZ-LIQUIDE A CONTRE-COURANT DANS UN SYSTEME DE DEUX TUBES MONTES EN PARALLELE	53
I.21 Introduction	53

	<u>Page</u>
I.22 Résultats relatifs à l'évolution d'un système de deux tubes	54
<u>I.221</u> Evolution du système de deux tubes à partir de l'état initial I : "tube-liquide et tube-gaz sec".	55
I.221.1 Etude de la transformation (I.1)	56
I.221.2 Etude de la transformation (I.2)	57
I.221.3 Etude de la transformation (I.3)	59
I.221.4 Etude de la transformation (I.4)	60
<u>I.222</u> Evolution du système à partir de l'état initial II : "tube-liquide et tube-gaz partiellement mouillé"	61
I.222.1 Etude de la transformation (II.4)	61
I.222.2 Etude des transformations (II.5) et (II.6)	62
<u>I.223</u> Evolution du système à partir de l'état initial III : "tube-liquide et tube-gaz mouillé"	63
I.23 Résultats relatifs au "débouchage" d'un tube-liquide ...	64
<u>I.231</u> Description du phénomène	64
<u>I.232</u> Discussion des résultats	65
I.24 Domaine d'écoulement de transition	67
I.25 Conclusion	68
<u>Chapitre I.3</u> ETUDE DE L'ECOULEMENT GAZ-LIQUIDE A CONTRE-COURANT DANS UN FAISCEAU DE TUBES	69
I.31 Description du poste d'étude du faisceau de tubes.....	69
<u>I.311</u> Introduction	69
<u>I.312</u> Vue d'ensemble de l'appareil	69
<u>I.313</u> La colonne	70
I.313.1 La section calmante	70
I.313.2 La section de mesure	71
I.313.3 La section supérieure	72

	<u>Page</u>
<u>I.314</u> Les circuits de fluide	72
I.314.1 Le circuit d'eau	72
I.314.2 Le circuit d'air	73
<u>I. 315</u> Les appareils de mesure	74
I.315.1 Mesure de la chute de pression	74
I.315.2 Mesure de la retenue liquide	75
I.315.3 Mesure des températures et des pressions des fluides	75
 I.32 Résultats expérimentaux	76
 <u>I.321</u> Les fonctionnements "réversibles" et "irréversibles": caractères généraux	76
 <u>I.322</u> Présentation des résultats complets	79
I.322.1 Retenues liquides de garnissage β	79
I.322.2 Chutes de pression de l'air	79
 <u>I.323</u> Interprétation des évolutions irréversibles et réversibles	81
I.323.1 Exemple simplifié. Principe du mécanisme	81
I.323.2 Traitement quantitatif complet	82
I.323.3 Utilisation des diagrammes établis pour un seul tube et pour deux tubes pour l'interpré- tation des fonctionnements irréversibles	85
I.323.4 Etude de l'évolution des systèmes réversibles	89
I.323.41 Interprétation des paliers des courbes $\frac{\Delta P}{\rho_L g_a Z} = f(\bar{l})_{\bar{g}}$	89
I.323.42 Evolution du système dans le domaine où $\frac{\Delta P}{\rho_L g_a Z}$ croît en fonction de $\bar{l}$ croissant ..	91
 <u>I.324</u> Conclusions	93
I.324.1 Retour sur l'interprétation des transformations irréversibles	93
I.324.2 Comparaison des valeurs de β , $\Delta P / \rho_L g_a Z$, N_L pour un même couple $(\bar{l}, \bar{g})$ pour les différents systèmes	94
I.324.3 Stabilité des différents systèmes	95

	<u>Page</u>
DEUXIEME PARTIE : ETUDE DE L'ECOULEMENT GAZ-LIQUIDE A CO-COURANT DESCENDANT DANS UN FAISCEAU DE TUBES	
<u>Chapitre II.1</u> ETUDE DE L'ECOULEMENT GAZ-LIQUIDE A CO-COURANT DESCENDANT DANS UN TUBE SEUL	97
II.11 Etude bibliographique	97
<u>II.111</u> Etude d'un type d'écoulement donné	99
<u>II.112</u> Relations de LOCKHART et MARTINELLI	100
<u>II.113</u> Méthode de résolution dite du facteur de frottement	102
<u>II.114</u> Résolution par analyse dimensionnelle	102
<u>II.115</u> Etude de paramètres locaux	103
II.12 Résultats expérimentaux	103
<u>II.121</u> Diagramme des différents types d'écoulement ...	104
<u>II.122</u> Variation de la chute de pression de l'air en fonction du débit d'eau	105
<u>II.123</u> Variation de la chute de pression de l'air en fonction du débit d'air	107
II.13 Conclusion, Diagramme des couples (ℓ, g) pour lesquels l'air subit à travers le système une chute de pression donnée	107
<u>Chapitre II.2</u> ETUDE DE L'ECOULEMENT GAZ-LIQUIDE A CO-COURANT DESCENDANT DANS UN FAISCEAU DE TUBES PARALLELES	108
II.21 Introduction	108
II.22 Etude des chutes de pression de l'air	109
II.23 Comparaison des résultats obtenus dans le cas d'un tube seul et dans le cas d'un faisceau de tubes ...	110
II.24 Modèle simplifié pour l'interprétation des propriétés hydrodynamiques du faisceau de tubes	112

	<u>Page</u>
<u>II.241</u> Méthode de résolution du système	112
<u>II.242</u> Résultats	114
II.242.1 Domaine où $(\Delta P / \rho_L g_a Z)$ est positive	114
II.242.2 Domaine où $(\Delta P / \rho_L g_a Z)$ est négative	118
II.25 Conclusion	120
Liste des références bibliographiques	
 TROISIEME PARTIE : COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS DANS UN GARNISSAGE D'ANNEAUX RASCHIG ET DE CEUX OBTENUS DANS UN FAISCEAU DE TUBES PARALLELES. 	
III.1 Recherche d'un critère d'équivalence du garnissage et du faisceau de tubes	121
III.2 Présentation des résultats	122
III.3 Comparaison des résultats obtenus pour l'écoulement à contre-courant	123
<u>III.31</u> Variations de $\Delta P / \rho_L g_a Z$ en fonction de $\bar{g}$	124
<u>III.32</u> Variations de $\Delta P / \rho_L g_a Z$ en fonction de $\bar{l}$	125
III.4 Comparaison des résultats obtenus pour l'écoulement à co-courant	128
<u>III.41</u> Variations de $\Delta P / \rho_L g_a Z$ en fonction de $\bar{g}$	128
<u>III.42</u> Variations de $\Delta P / \rho_L g_a Z$ en fonction de $\bar{l}$	129
<u>III.43</u> Diagramme $(\bar{l}, \bar{g})$	130
III.4 Conclusion	130
NOTATIONS	132
TABLE DES MATIERES	133

Deuxième Thèse

Proposition donnée par la Faculté

SECHAGE EN MILIEU FLUIDISE

Vu et approuvé

Nancy, le

1966

Le Doyen de la Faculté des Sciences

M. AUBRY

Vu et permis d'imprimer

Nancy, le

1966

Le Recteur de l'Académie de Nancy

Président du Conseil d'Université

P. IMBS

